# 光机电一体化技术应用100例

林　宋　郭瑜茹　编著

第2版






机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

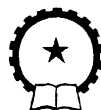
VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

# 光机电一体化技术应用 100 例

**第 2 版**

林　宋　郭瑜茹　编著



机　械　工　业　出　版　社

本书内容新颖，系统全面，在第1版的基础上，对产品和技术进行重新分门别类，归纳总结了光机电一体化技术的基本理论和在设计、制造、仪器仪表、工程机械、交通、医疗卫生、日用生活和军事等方面的应用和产品实例，力求及时地反映光机电一体化技术在国内外的最新进展和作者的有关研究成果，重点介绍了光机电一体化技术的工程应用方法和实现方法，注重理论联系实际，配有大量说明图表，尽量避免冗长的公式推导，偏重普及性、实用性和新颖性，在内容深度和语言叙述方面力求满足不同层次读者的需求。

本书适合光机电一体化工程技术人员阅读，也适合高校机械类专业教学参考。

**图书在版编目（CIP）数据**

光机电一体化技术应用100例/林宋，郭瑜茹编著．—2版．—北京：机械工业出版社，2010.2

ISBN 978-7-111-29732-1

Ⅰ．①光…　Ⅱ．①林…②郭…　Ⅲ．①光电技术－机电一体化　Ⅳ．①TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第022993号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
策划编辑：黄丽梅　责任编辑：黄丽梅　版式设计：霍永明
责任校对：李秋荣　封面设计：姚　毅　责任印制：乔　宇
北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）
2010年4月第2版第1次印刷
169mm×239mm · 26.75印张 · 614千字
0 001—4 000册
标准书号：ISBN 978-7-111-29732-1
定价：48.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
社服务中心：(010) 88361066
销 售 一 部：(010) 68326294
销 售 二 部：(010) 88379649
读者服务部：(010) 68993821

网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com

**封面无防伪标均为盗版**

# 前　　言

光机电一体化是激光技术、微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术的相互交叉与融合，是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。它包括产品和技术两方面。光机电一体化产品是集光学、机械、微电子、自动控制和通信技术于一体的高科技产品，具有很高的功能和附加值；光机电一体化技术是指其技术原理和使光机电一体化产品得以实现、使用和发展的技术。

目前，国际上产业结构的调整使得各个行业不断融合和协调发展。作为光学、机械与电子相结合的复合产业，光机电一体化产业以其特有的技术带动性、融合性和普适性，受到了国内外科技界、企业界和政府部门的特别关注。它在提升传统产业的过程中，带来高度的创新性、渗透性和增值性，被誉为21世纪最具魅力的朝阳产业。

现代产品开发人员，不仅要熟悉机械结构、光学系统、传感器、信息处理和控制等方面的知识，而且要熟悉计算机的硬件接口和软件设计方面的知识，这样才能开发出结构简单、功能齐全、效率高、精度高、能耗低、附加值高的光机电一体化产品。本书精选了19项光机电一体化技术和81项光机电一体化产品，尽量以较为丰富的内容和翔实的材料启迪读者的思维，起到抛砖引玉的作用。

本书内容新颖，系统全面，在第1版的基础上，对产品和技术进行重新分门别类，归纳总结了光机电一体化技术的基本理论和在设计、制造、仪器仪表、工程机械、交通、医疗卫生、日用生活和军事等方面的应用和产品实例，力求及时地反映光机电一体化技术在国内外的最新进展和作者的有关研究成果，重点介绍了光机电一体化技术的工程应用方法和实现方法，注重理论联系实际，配有大量说明图表，尽量避免冗长的公式推导，偏重普及性、实用性和新颖性，在内容深度和语言叙述方面力求满足不同层次读者的需求，适合工程技术人员阅读和高校机械类专业教学的需求。

本书由林宋、郭瑜茹编写，编写过程中，刘勇、杨野平、彭兴礼、李冬军、尚国清、叶天朝、倪志刚、李奇志、张朴、林琳等为了本书的顺利完稿做了很多工作。全书由林宋统稿。

由于作者水平有限，敬请读者提出批评和宝贵的意见。

作　者

# 目　　录

前言
第 1 章　光机电一体化技术及其产品开发 …… 1
1.1　概述 …… 1
1.2　光机电一体化技术的特征 …… 1
1.3　光机电一体化技术的应用 …… 3
1.3.1　设计信息的处理和传输 …… 3
1.3.2　生产过程中的检测 …… 3
1.3.3　激光在加工中的运用 …… 4
1.4　光机电一体化产品 …… 4
1.4.1　光机电一体化产品组成 …… 4
1.4.2　光机电一体化产品的特点 …… 6
1.4.3　光机电一体化技术领域的优先发展产品 …… 6
1.5　光机电一体化技术的发展方向 …… 9
第 2 章　在设计方面的应用技术与产品 …… 11
2.1　计算机仿真技术 …… 11
2.1.1　概述 …… 11
2.1.2　计算机仿真技术的特点 …… 11
2.1.3　计算机仿真技术的应用 …… 12
2.2　逆向工程技术 …… 13
2.2.1　概述 …… 13
2.2.2　逆向工程的应用 …… 13
2.2.3　三坐标测量机 …… 14
2.2.4　三维激光扫描仪 …… 16
2.3　虚拟现实技术 …… 20
2.3.1　虚拟现实技术的体系结构和特征 …… 20
2.3.2　虚拟现实系统的组成 …… 20
2.3.3　虚拟现实系统的分类 …… 23
2.3.4　虚拟现实的关键技术 …… 24
2.3.5　虚拟现实技术的应用 …… 25
第 3 章　在制造方面的应用 …… 30
3.1　激光切割技术 …… 30
3.1.1　概述 …… 30
3.1.2　激光切割原理 …… 30
3.1.3　激光切割的分类 …… 31
3.1.4　激光切割机器人 …… 32

3.1.5　激光切割特点 …… 33
3.1.6　激光切割的应用 …… 34
3.1.7　激光切割技术发展趋势 …… 35
3.2　激光热处理技术 …… 37
3.2.1　激光热处理原理 …… 37
3.2.2　激光热处理技术的特点 …… 37
3.2.3　激光热处理设备 …… 38
3.2.4　激光热处理技术的应用 …… 40
3.3　激光打孔技术 …… 42
3.3.1　激光打孔机的组成 …… 42
3.3.2　激光打孔的原理及方法 …… 42
3.3.3　激光打孔的工艺参数分析 …… 44
3.3.4　激光打孔的特点 …… 45
3.3.5　激光打孔的应用 …… 46
3.4　激光清洗技术 …… 46
3.4.1　激光清洗的工作原理 …… 47
3.4.2　激光清洗的分类 …… 47
3.4.3　激光清洗的方法 …… 48
3.4.4　激光清洗的应用 …… 48
3.5　激光焊接技术 …… 51
3.5.1　激光焊接原理 …… 52
3.5.2　激光焊接特点 …… 52
3.5.3　激光焊接设备 …… 53
3.5.4　激光焊接工艺 …… 54
3.5.5　激光焊接的应用 …… 55
3.6　激光快速成形技术 …… 56
3.6.1　激光快速成形的基本原理和特点 …… 57
3.6.2　激光快速成形的工艺 …… 57
3.6.3　激光快速成形的关键技术 …… 60
3.6.4　激光快速成形技术的应用 …… 61
3.7　激光再制造技术 …… 63
3.7.1　激光再制造技术的主要种类 …… 63
3.7.2　激光再制造系统的构成 …… 63
3.7.3　激光熔覆工艺方法 …… 64
3.7.4　激光再制造技术的工业应用 …… 67
3.8　特种加工技术 …… 69
3.8.1　电子束加工 …… 70
3.8.2　离子束加工 …… 72
3.8.3　电火花加工 …… 74
3.8.4　电解加工 …… 75

3.8.5 超声波加工 …… 77
3.8.6 液体喷射加工 …… 78
3.8.7 电解磨削 …… 80
3.8.8 电铸加工 …… 81
3.9 数控加工设备 …… 85
3.9.1 CJK6240 数控车床 …… 86
3.9.2 XK5025 数控铣床 …… 89
3.9.3 XHK716 型立式加工中心 …… 95
3.9.4 数控五轴联动激光加工机 …… 103
3.9.5 HCD300K 型数控电火花加工机床 …… 110
3.9.6 NCUT-ME30 型数控雕铣机 …… 113
3.9.7 虚拟轴机床 …… 117
3.9.8 电主轴 …… 123
**第4章 在仪器仪表中的应用** …… 128
4.1 光电编码器 …… 128
4.1.1 光电编码器的工作原理 …… 128
4.1.2 光电编码器的结构 …… 128
4.1.3 光电编码器的类型 …… 129
4.1.4 光电脉冲编码器的应用实例 …… 131
4.2 光纤传感器 …… 132
4.2.1 光纤传感器的基本结构 …… 132
4.2.2 光纤传感器的工作原理 …… 133
4.3 便携式隧道断面激光测量仪 …… 135
4.3.1 便携式隧道断面激光测量仪的工作原理 …… 135
4.3.2 便携式隧道断面激光测量仪的测量形式 …… 136
4.3.3 便携式隧道断面激光测量仪的硬件构成 …… 136
4.3.4 便携式隧道断面激光测量仪的软件设计 …… 136
4.3.5 便携式隧道断面激光测量仪的测试项目和结果 …… 137
4.4 激光准直仪 …… 137
4.4.1 激光准直仪的工作原理 …… 137
4.4.2 激光准直仪的组成 …… 138
4.4.3 激光准直的应用实例 …… 141
4.5 数字显微硬度计 …… 142
4.5.1 数字显微硬度计的仪器构成 …… 143
4.5.2 数字显微硬度计的工作方式 …… 143
4.5.3 数字显微硬度计的控制系统 …… 144
4.5.4 数字显微硬度计的硬件部分 …… 144
4.5.5 数字显微硬度计的测试软件及数据库 …… 145
4.6 活塞外轮廓测量仪 …… 146
4.6.1 活塞外轮廓测量仪的工作原理与构成 …… 147

4.6.2　活塞外轮廓测量仪的硬件系统 …… 147
4.6.3　活塞外轮廓测量仪的软件系统 …… 150
4.7　激光扫描声学显微镜 …… 150
4.7.1　激光扫描声学显微镜的工作原理 …… 151
4.7.2　激光扫描声学显微镜的应用 …… 152
4.8　数字微镜器件 …… 153
4.8.1　数字微镜器件的设备结构 …… 153
4.8.2　数字微镜器件的应用 …… 154
4.9　激光微束装置 …… 155
4.9.1　激光微束装置的组成 …… 156
4.9.2　激光波长的选择 …… 156
4.10　激光扫平仪 …… 159
4.10.1　激光扫平仪的工作原理 …… 159
4.10.2　激光扫平仪的类型 …… 159
4.10.3　激光扫平仪的工程应用 …… 160
4.11　数字化超声波探伤仪 …… 161
4.11.1　数字化超声波探伤仪的基本结构 …… 162
4.11.2　数字化超声波探伤仪的系统组成 …… 162
4.11.3　数字化超声波探伤仪的数据采集 …… 163
4.11.4　数字化超声波探伤仪的系统软件 …… 164
4.12　带有集成传感器的轴承单元 …… 165
4.12.1　带有集成传感器的轴承单元的结构特征 …… 165
4.12.2　带有集成传感器的轴承单元的工作原理 …… 166
4.12.3　带有集成传感器的轴承单元的特点 …… 167
4.12.4　带有集成传感器的轴承单元的应用领域 …… 167
4.13　扫描隧道显微镜 …… 167
4.13.1　扫描隧道显微镜的工作原理 …… 168
4.13.2　扫描隧道显微镜的设备组成 …… 169
4.13.3　扫描隧道显微镜的工作方式 …… 169
4.13.4　扫描隧道显微镜的应用 …… 170
4.14　微致动器 …… 171
4.14.1　微致动器的工作原理 …… 171
4.14.2　微致动器的种类 …… 171
4.14.3　微致动器的工程应用 …… 171
4.15　微机器人 …… 174
4.15.1　微机器人系统 …… 175
4.15.2　典型微机器人 …… 176
4.16　光栅测量系统 …… 179
4.16.1　光栅结构 …… 179
4.16.2　光栅工作原理 …… 180

4.16.3　光栅种类 …… 181
4.16.4　光栅精度 …… 182
4.16.5　光栅测量系统的工程应用 …… 183
4.17　激光陀螺仪 …… 183
4.18　红外测油仪 …… 183
4.18.1　红外测油仪的测量原理 …… 184
4.18.2　红外测油仪的结构 …… 184
4.18.3　红外测油仪的主要应用领域 …… 186
4.19　光栅数显表 …… 187
4.20　激光扫描显微镜 …… 188
**第5章　在工程机械方面的应用** …… 190
5.1　盾构机 …… 190
5.1.1　盾构机的类型和组成 …… 190
5.1.2　土压平衡式盾构机工作原理 …… 192
5.1.3　主要盾构技术与方法 …… 195
5.2　枕式包装机 …… 196
5.2.1　制动式光电自动定位系统的基本原理 …… 197
5.2.2　制动进退式定位系统 …… 197
5.2.3　速度检测与包装纸长度测量 …… 198
5.2.4　色标对标方法与调整 …… 198
5.3　水泥智能包装机 …… 199
5.3.1　秤架原理 …… 199
5.3.2　水泥智能包装机的系统构成 …… 200
5.3.3　水泥智能包装机的工作过程 …… 200
5.4　全自动液体包装机 …… 201
5.4.1　全自动液体包装机的工作原理 …… 201
5.4.2　全自动液体包装机的控制系统 …… 201
5.4.3　全自动液体包装机的技术指标 …… 202
5.4.4　全自动液体包装机的性能特点 …… 202
5.5　高温线材打捆机 …… 203
5.5.1　打捆机的工作原理 …… 203
5.5.2　高温线材打捆机系统的组成 …… 203
5.5.3　打捆机系统的控制系统 …… 204
5.5.4　PLC应用程序的研制 …… 204
5.5.5　高温线材打捆机的特点 …… 205
5.6　圆柱电阻激光自动刻槽机 …… 206
5.6.1　圆柱电阻激光自动刻槽机的工作原理 …… 206
5.6.2　圆柱电阻激光自动刻槽机的结构 …… 206
5.7　自动旋转门 …… 208
5.7.1　自动旋转门的主要类型 …… 208

5.7.2　自动旋转门系统的结构特点和工作原理 …… 209
5.7.3　自动旋转门的主要控制功能 …… 210
5.7.4　环柱式自动旋转门的驱动控制系统设计 …… 210
**第6章　在交通方面的应用** …… 215
6.1　汽车ABS系统 …… 215
6.1.1　汽车ABS系统的工作原理 …… 216
6.1.2　汽车ABS系统的工作过程 …… 216
6.1.3　汽车ABS系统的组成 …… 217
6.1.4　汽车ABS系统的分类 …… 220
6.2　汽车安全气囊系统 …… 222
6.2.1　汽车安全气囊系统的工作原理 …… 223
6.2.2　汽车安全气囊系统的组成及结构原理 …… 224
6.3　汽车巡航控制系统 …… 227
6.3.1　汽车巡航控制系统的功能及优点 …… 227
6.3.2　汽车巡航控制系统的工作原理 …… 228
6.3.3　电子式巡航控制系统 …… 229
6.3.4　主动巡航控制系统 …… 233
6.4　汽车用激光雷达 …… 234
6.4.1　汽车用激光雷达的测距原理 …… 234
6.4.2　汽车用激光雷达的系统构成和测量方式 …… 235
6.4.3　汽车用激光雷达的技术指标 …… 235
6.4.4　汽车用激光雷达的性能测试结果 …… 236
6.5　汽车防撞系统 …… 238
6.5.1　激光-单片机组合的汽车防撞系统 …… 238
6.5.2　激光雷达汽车自动防撞微机控制系统 …… 240
6.5.3　汽车防撞系统的应用 …… 242
**第7章　在节能环保方面的应用** …… 243
7.1　太阳电池 …… 243
7.1.1　太阳电池的工作原理 …… 243
7.1.2　太阳电池的种类 …… 243
7.1.3　硅太阳电池的结构 …… 243
7.1.4　太阳电池的制造工艺 …… 245
7.1.5　太阳电池的有关参数 …… 245
7.1.6　提高太阳电池效率的方法 …… 246
7.1.7　太阳电池的应用实例 …… 247
7.2　太阳能热水器 …… 248
7.2.1　太阳能热水器组成 …… 248
7.2.2　太阳能热水器的工作原理 …… 248
7.2.3　太阳能热水器的分类 …… 249
7.2.4　太阳能热水器控制器 …… 250

7.3 光电幕墙 …… 252
7.3.1 概述 …… 253
7.3.2 光电幕墙的原理及结构特点 …… 253
7.3.3 光电幕墙的组成 …… 254
7.3.4 光电幕墙的特点 …… 255
7.3.5 光电幕墙的应用实例 …… 255
7.4 风光互补发电系统 …… 260
7.4.1 风光互补发电系统的组成 …… 260
7.4.2 风光互补发电系统的实际应用 …… 262
7.4.3 风光互补发电系统的优点 …… 263
7.5 变频空调 …… 263
7.5.1 变频空调的工作原理 …… 263
7.5.2 变频空调的类型 …… 264
7.5.3 变频空调的系统构成 …… 264
7.5.4 变频空调的特点 …… 266
7.5.5 变频空调器硬件系统 …… 266
7.5.6 变频调速的关键技术 …… 268
7.6 模糊控制洗衣机 …… 269
7.6.1 模糊控制洗衣机的控制原理 …… 269
7.6.2 混浊度检测 …… 270
7.7 无动力屋顶通风机 …… 273
7.7.1 无动力屋顶通风机的工作原理 …… 274
7.7.2 无动力屋顶通风机的设备组成 …… 274
7.7.3 无动力屋顶通风机的功能 …… 275
7.7.4 无动力屋顶通风机的特点 …… 275
7.7.5 无动力屋顶通风机的设备安装 …… 276
7.7.6 无动力屋顶通风机的应用实例 …… 277
7.8 太阳能通道灯 …… 277
7.8.1 太阳能通道灯的工作原理 …… 277
7.8.2 直流/交流负载选择 …… 278
7.8.3 太阳电池板 …… 278
7.8.4 控制器 …… 279
7.8.5 蓄电池 …… 279
7.8.6 逆变器 …… 279
7.8.7 其他部件 …… 280
**第8章 在医疗卫生方面的应用** …… 281
8.1 医用X射线机 …… 281
8.1.1 医用X射线机的组成和分类 …… 281
8.1.2 医用X射线机的工作原理 …… 282
8.1.3 医用X射线管 …… 282

8.1.4　医用X射线机的电路结构 …… 284
8.1.5　机械辅助装置 …… 284
8.2　激光音乐全息理疗系统 …… 286
8.2.1　音乐与激光 …… 287
8.2.2　激光音乐全息理疗系统的工作原理 …… 287
8.2.3　激光音乐全息理疗系统的结构 …… 287
8.3　CT成像系统 …… 288
8.3.1　CT成像系统的工作原理 …… 289
8.3.2　CT成像系统的组成 …… 289
8.3.3　CT图像重建 …… 293
8.4　流式细胞仪 …… 293
8.4.1　流式细胞仪的基本原理 …… 294
8.4.2　流式细胞仪的基本结构 …… 295
8.4.3　流式细胞仪在医学上的应用 …… 296
**第9章　在日用生活方面的应用** …… 298
9.1　网络家电 …… 298
9.1.1　网络家电系统的组成 …… 300
9.1.2　典型的网络家电 …… 301
9.2　4D影院 …… 303
9.2.1　4D影院系统的构成要素 …… 303
9.2.2　环幕立体放映系统 …… 304
9.2.3　特效座椅和特效设备 …… 306
9.2.4　计算机控制系统 …… 307
9.3　全自动洗碗机 …… 307
9.3.1　全自动洗碗机的工作原理 …… 308
9.3.2　全自动洗碗机的组成 …… 308
9.3.3　全自动洗碗机的控制 …… 310
9.4　音乐喷泉 …… 310
9.4.1　音乐喷泉的系统构成 …… 311
9.4.2　音乐喷泉的工作原理 …… 312
9.4.3　音乐喷泉的控制系统 …… 312
9.4.4　音乐喷泉的控制流程 …… 313
9.5　立体车库 …… 314
9.5.1　常见立体车库类型及特点 …… 315
9.5.2　车库设置及机械执行系统 …… 319
9.5.3　控制系统 …… 320
9.5.4　信息管理系统 …… 320
9.6　发卡器 …… 321
9.6.1　发卡器的机构组成 …… 322
9.6.2　发卡器的工作原理 …… 322

9.7　自动化立体仓库 …… 322
9.7.1　自动化立体仓库的组成 …… 322
9.7.2　自动化立体仓库的类型 …… 326
9.7.3　自动化立体仓库的特点 …… 327
9.7.4　自动化立体仓库的管理与控制 …… 328
9.8　网络摄像机 …… 328
9.8.1　网络摄像机的组成 …… 328
9.8.2　图像的编码标准 …… 330
9.9　数码相机 …… 331
9.9.1　数码相机的组成 …… 331
9.9.2　数码相机的成像原理 …… 333
9.9.3　数码相机的数据处理 …… 336
9.9.4　数码相机的特点 …… 336
9.10　传真机 …… 337
9.10.1　传真机的基本原理 …… 337
9.10.2　传真机的组成 …… 339
9.10.3　传真机的分类 …… 341
9.10.4　传真机的主要技术指标 …… 341
9.11　刻录机 …… 342
9.11.1　刻录机的原理 …… 342
9.11.2　刻录机的分类 …… 342
9.11.3　刻录机的主要性能指标 …… 343
9.12　静电复印机 …… 344
9.12.1　静电复印机的结构 …… 344
9.12.2　静电复印机的工作原理 …… 345
9.13　光盘驱动器 …… 348
9.13.1　光盘驱动器的组成与结构 …… 348
9.13.2　光盘数据读出原理 …… 350
9.13.3　光盘伺服系统 …… 352
9.13.4　光学头运动机构 …… 353
9.14　扫描仪 …… 354
9.14.1　扫描仪的组成 …… 354
9.14.2　扫描仪的工作原理 …… 356
9.14.3　扫描仪的工作过程 …… 356
9.14.4　扫描仪的种类 …… 357
9.14.5　扫描仪的光电器件 …… 358
9.14.6　扫描仪的接口 …… 359
9.14.7　扫描仪的分辨率 …… 360
9.15　激光打印机 …… 360
9.15.1　激光打印机的工作原理 …… 360

9.15.2　激光打印机的基本结构 …… 362
9.15.3　激光打印机的主要接口类型 …… 368
9.16　光标阅读器 …… 369
9.16.1　光标阅读器的工作原理 …… 369
9.16.2　光标阅读器的特点 …… 374
9.16.3　光标阅读器的应用领域 …… 374
9.17　光盘 …… 375
9.18　光电鼠标 …… 378
9.18.1　光电鼠标的工作原理 …… 378
9.18.2　光电鼠标的结构 …… 379
9.18.3　光电鼠标的技术核心 …… 381
**第10章　在军事方面的应用** …… 382
10.1　电磁炮 …… 382
10.1.1　概述 …… 382
10.1.2　电磁炮的原理和结构 …… 383
10.1.3　电磁炮的特点 …… 385
10.1.4　电磁炮的应用领域 …… 386
10.2　红外热像仪 …… 387
10.2.1　红外热像仪的工作过程 …… 387
10.2.2　红外热像仪的工作原理 …… 390
10.2.3　红外热像仪的特点 …… 391
10.2.4　红外热像仪的种类 …… 391
10.2.5　红外热像仪的应用 …… 391
10.3　夜视仪 …… 393
10.3.1　夜视仪的分类 …… 393
10.3.2　夜视仪的工作原理 …… 393
10.3.3　夜视仪的应用实例 …… 394
10.4　多传感器稳定集成系统 …… 395
10.5　Sea Star SAFIRE 吊舱 …… 397
10.6　Brite Star 激光指示器 …… 399
10.7　SeaFLIR 光电吊舱 …… 400
10.8　法国 DCN 国际公司的舰用火控系统 DCN OP3A/SARA …… 402
10.9　荷兰信号公司的光电火控系统 …… 404
10.10　红外搜索和跟踪系统 …… 405
**参考文献** …… 409

# 第1章　光机电一体化技术及其产品开发

## 1.1　概述

光机电一体化技术是由光学、机械学、电子学、信息处理和控制及软件等当代各种新技术交叉与融合构成的综合技术。光机电一体化技术不是机械技术与电子和光学技术的简单叠加，而是在信息论、控制论和系统论的基础上建立起来的应用技术，它是从系统的观点出发，将这些单元技术在系统工程基础上加以有机地综合，实现整个系统的优化。随着微电子技术和微系统技术的发展，光机电一体化技术的应用与发展进入了一个全新的阶段。目前，光机电一体化技术已成为诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。它在工业设备改造、提高制造装备精度和效率方面起到了重要的作用。信息、生物、空间、海洋、新材料、新能源等高科技领域，国防装备的信息化、现代化及传统产业的改造都离不开光机电一体化技术的发展。

## 1.2　光机电一体化技术的特征

与传统的单元技术相比较，光机电一体化技术具有以下特征：

**1. 综合性与系统性**

光机电一体化是集激光技术、微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术之大成的综合性技术。这种多种技术的综合及多个部分的组合，使得光机电一体化技术及其产品更具有系统性、完整性和科学性。其各个组成部分如机械本体、微电子技术、自动控制、信息交换与处理、传感检测、输入输出接口、模拟量与数字量转化，以及软件技术等，在综合成一个完整的系统中有严格的相互配合要求，这就需要取长补短，不断向理想化方向发展。其结果使原来各种技术扬长避短，更趋于合理。

**2. 多层次，覆盖面广**

光机电一体化是一个总的技术指导思想，它不仅体现在一些机电一体化的单机产品之中，而且贯穿于工程系统设计之中。从简单的单台光机电一体化产品，到现代工业中的柔性加工系统；从简单的单参数显示，到复杂的多参数、多级控制；从机械零部件连续自动热处理生产线，到各种现代高速重型机械自动化生产线等，光机电一体化技术都有不同层次、覆盖面很广的应用领域。对于工程系统，需成套地进行开发和制造。对于光机电一体化单机产品（设备），应采用简繁并举、高低级并存的多层次发展途径。可发展功能附加型的低级产品，也可发展功能替代型的中级产品，还可发展机电融合型的高级产品，成为前所未有的新一代产品。

**3. 结构简化，方便操作**

光机电一体化技术可将过去靠机械传动链连接的各个相关动作部分，改用几台电

动机分别驱动，或用电力电子器件，或用电子电控装置进行相关动作控制来实现。因此，使机械结构大大简化，甚至使有些机械结构“脱胎换骨”，产生了质的变化。光机电一体化技术使得操作人员摆脱了以往必须按规定操作程序或节拍频繁紧张地进行单调重复操作的工作方式，能灵活方便地按需控制和改变生产操作程序。任何一台光机电一体化装置或系统的各个相关传动机构的动作及功能协调关系，可按照预设的程序一步一步地由电子控制系统指挥，如数控机床、柔性制造系统（FMS）等。有些光机电一体化装置，可实现操作全自动化，如工业机器人、印制电路板数控高速钻床等。有些更高级的光机电一体化系统，还可通过被控对象的数学模型，并根据任何时刻外界各种参数的变化情况，随机自寻最佳工作程序、动作程度和频率及协调关系，以实现最优化工作及最佳操作，如微机控制的热连轧机钢板测厚自控系统、电梯群控系统、智能机器人等。

**4. 精度提高，功能增加**

光机电一体化技术使机械传动部件减少，因而使机械磨损及配合间隙等所引起的动作误差大大减小，同时由于采用了电子技术，反馈控制水平提高并能进行高速处理，可通过电子自动控制系统精确地按预设量使相应机构动作，因各种干扰因素造成的误差，可通过自控系统自行诊断、校正、补偿来达到靠单纯机械方式所不能实现的工作精度。因而光机电一体化产品应用领域宽，适用面广，易于满足各种需要。电子技术的引入，使产品面貌发生巨大变化，电子装置能按照人的意图进行自动控制、自动检测、信息采集及处理、调节、修正、补偿、自诊断、自动保护直至自动记录、显示、打印工作结果。通过改变程序、指令等软件内容而无需改动硬件部分就可变换产品的功能，使机械控制功能内容的确定和变化趋于软件化和智能化。

**5. 高可靠性，高稳定性和高使用寿命**

传统的机械装置的运动部分，一般都伴随着磨损及运动部件配合间隙所引起的动作误差，而发出由于摩擦、撞击、振动等引起的声响（噪声），这显然影响装置的寿命、稳定性和可靠性。而光机电一体化技术的应用，使装置的可动部件减少，磨损也大为减少，像集成化接近开关甚至无可动部件、无机械磨损。因此，装置的寿命提高，故障率降低，从而提高了产品的可靠性和稳定性。有些光机电一体化产品甚至做到不需维修或者具有自诊断功能。

**6. 开发上的知识密集性**

研制开发光机电一体化产品往往要涉及许多学科和专业知识，如数学、物理学、化学、声学、机械工程学、电力电子学、电工学、系统工程学、光学、控制论、信息论和计算机科学等多门学科及各门类的专业知识。比如人们很熟悉的静电复印机、彩色印像机等，就是一种由光、机、电、磁、化学等多种学科和技术复合创新的新型产品。设计这类产品对工程技术人员自身的知识结构提出更新更高的要求。现代化的技术更需要现代化的人才来掌握和开发。要开发多种功能的先进设备，必然需要赋予它多种知识和智慧。

## 1.3 光机电一体化技术的应用

光机电一体化技术的应用主要包括在设计中和加工制造中的应用。光机电一体化技术在设计中的应用也就是光机电一体化设计，它要求设计者不仅要熟悉机械结构、光学系统、传感器、信息处理和控制等方面的知识，而且要熟悉计算机的硬件接口和软件设计方面的知识。

### 1.3.1 设计信息的处理和传输

信息的获取、传输、存储、处理等技术手段已成为设计活动的重要工具，利用计算机的高速运算和存储能力，实现对设计过程中所产生的大量数据的实时采集和处理，实现计算结果和计算过程的可视化，对图像信息进行自动处理和自动识别，实现设计的信息化和数字化，实现基于网络的计算机支持的协同工作（CSCW）和信息共享；还可以计算机作为上位机、可编程控制器作为下位机，使系统结构有层次，接口合理，便于维护。光机电一体化技术在机械工程的信息处理方面的应用主要体现在计算机仿真、逆向工程和虚拟现实技术的大量深入的开展上。

通过网络技术实现包括数据、硬件和信息的资源共享，利用仿真技术来评估运行效果，辅助决策。利用包含各种遗传算法、神经网络数据处理方法、专家系统及决策支持系统的智能化软件来优化数据处理，提高运行速度，并可提高决策能力和正确率。人工神经网络是研究生物神经网络的结果，是对人脑的部分抽象、简化和模拟，反映了人脑学习和思维的一些特点。人工神经网络是一种信息处理系统，它可以用于一些计算机难以处理的领域，如模式识别、人工智能、优化等问题；也可以用于各种工程技术，特别适用于过程控制、诊断、监控、生产管理、质量管理等方面。

### 1.3.2 生产过程中的检测

激光测距具有探测距离远、测距精度高、抗干扰性强、体积小、重量轻等特点。激光干涉可以运用于精密丝杠、机床、零件、数控设备的测量和校验，坐标精密定位，光学平面检测和地震预测。激光测速具有测速准确、非接触测量、空间分辨率高的特点，可测量速度分布和速度梯度。激光准直能够测量平直度、平面度、平行度、垂直度，也可以做三维空间的基准测量，如大型设备的安装、准直，水坝应力监测，机场的夜间导航，矿山的远距离引爆，大型隧道的自动导航钻进等都可利用激光的准直定位装置。

由于光电系统具有光学和电子两方面的技术优势，能满足生产过程中的自动监控及图像分析、精密测量、信息处理和传输、微观探索等各个领域的要求，特别能适应对高速运动或瞬息短暂过程的观察、记录、显示、传递和储存。利用光电转换就能在太空、深水、高温、有毒有害气体、核辐射等各种特殊环境下正常地工作。例如，轧钢生产现场条件极为恶劣，被测件温度超过 1000℃，运动速度为数米每秒，并伴有振动、高温、氧化层飞溅、冷却水雾弥漫和强电磁干扰，这时利用 CCD 光电在线测径系

统在轧钢生产中进行在线尺寸测量，控制生产流程，就能保证产品高质量和生产高效率。

### 1.3.3 激光在加工中的运用

**1. 激光加工**

激光具有高相干性、高单色性、高方向性和高亮度的特点，激光加工方法已广泛应用于汽车、航空、航天、通信、微电子等众多行业。它可以对多种金属、非金属进行加工，特别是可以加工高硬度、高脆性及高熔点的材料（如电子工业中常用的陶瓷材料、硅片等）。其工艺范围广，加工速度快、无噪声、无污染，可以满足各类材料的切割、打孔、焊接、表面热处理、表面合金化要求。由于在加工过程中无切削力对工件的影响，因此工件的变形很小；同时由于激光能量高度集中，加热冷却速度快，可通过控制激光的功率密度和脉冲计数，按要求达到确定的去除深度，从而实现高精度的线切割和点钻孔加工。

**2. 金属表面的激光强化**

使用激光进行淬火，可精确控制淬硬层深度，实行自冷淬火，并易于实现数控，只要光束能照到的部位均可进行处理。在汽车生产中，如钢套、曲轴、活塞环和齿轮等经激光热处理后，不必再进行后处理，可直接送到装配线上安装。激光合金化与熔覆可将一种或多种合金元素与基材表面快速融凝，从而使基材表层具有预定的高合金特性。

**3. 激光快速成形**

激光快速成形技术综合了计算机、CAD、数控、物理、化学、材料等多学科领域的先进成果，其制造思想是将传统的材料去除和变形成形转变为逐渐增加材料的方法，将三维实体按一定方向平面化，然后分层叠加，最后得出快速原形体。可以一次成形复杂的零部件或模具，具有速度快、柔性好、集成度高等特点。

**4. 激光金属塑性成形**

激光金属塑性成形是利用激光束扫描金属板材，形成的非均匀温度场所导致的热应力来实现塑性变形的成形方法。与传统的金属成形工艺相比，它具有不需要外力和模具、生产柔性大、加工成本低、成形精度高等特点，特别适合于形状简单的单件小批量工件的弯曲成形，在船舶、汽车、微电子和航空航天等领域具有广阔的应用前景。

## 1.4 光机电一体化产品

光机电一体化一般集光机电一体化产品（系统）和光机电一体化技术两层含义。典型的光机电一体化产品（系统）有数控机床、机器人、汽车电子化产品、智能化仪器仪表、电子排版印刷系统、CAD/CAM 系统等。

### 1.4.1 光机电一体化产品组成

光机电一体化产品是包含光学技术、机械技术、微电子技术、计算机技术、信息

技术、自动控制技术和通讯技术于一体的高科技产品。光机电一体化产品是在其组成的各种技术相互渗透、相互融合的基础上，相互辅助、相互促进和提高，充分利用各个相关技术的优势，扬长避短，使组合后的整体功能大于组成整体的各个部分功能之和，使系统或设备的性能达到精密化、高柔化、智能化。

典型的光机电一体化产品分为系统（整机）和基础元部件两类，光机电一体化产品主要包括五大类：

1）先进制造技术设备。

2）机电一体化机械设备。

3）机电基础件。

4）仪器仪表。

5）监控设备及控制系统。

光机电一体化系统是由动力系统、机械本体、执行装置、电子控制单元和光电检测传感器 5 个部分组成的一个功能完善的自动化系统，如图 1-1 所示。其中电子控制单元和光电检测传感器是光机电一体化系统的重要组成部分，图 1-2 的数控机床伺服系统就是一个典型的例子。

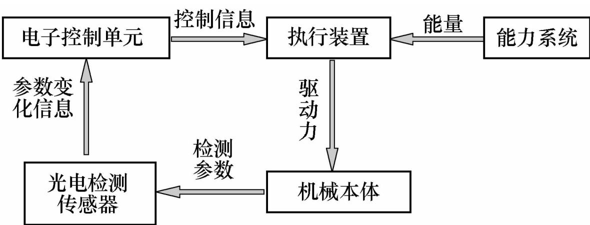



图 1-1　光机电一体化系统的构成

1）电子控制单元由计算机和输入输出口组成。在光机电一体化产品中，常用的计算机有单片机、可编程控制器和工业控制计算机等。输入输出口是控制器接受传感器返回的电信号，并将处理结果输出，从而驱动执行装置的接口，进行处理、运算、决策，实现控制功能。要求高可靠性、柔性和智能性。

2）执行装置包括机械传动与操作机构，接收控制信息，按照控制器发出的指令，将光电信号转换为机械能，驱动机械部分进行运动，完成要求的动作，实现主功能。

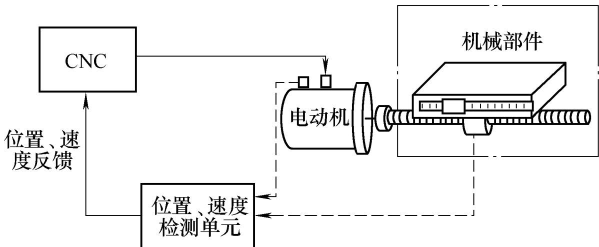



图 1-2　数控机床伺服系统组成

3）光电检测传感器是获取信息的工具，它检测产品内部状态和外部环境，将被测对象的状态转化为光电信号，实现计测功能。应做到体积小、精度高、抗干扰。

4）机械本体是光机电一体化产品所有功能的支撑结构，完成系统的结构功能。机械结构以机身、框架、机械连接等形态来支持机构，实现构造功能，它在光机电一体化产品中往往占据很大的体积和重量，因此应尽量采用新材料、新工艺、新结构，使光机电一体化产品具有可靠、紧凑、美观的特点。

5）动力系统为光机电一体化产品提供能量，转换成需要的形式，实现动力功能。

应力求效率高和可靠性好。

光机电一体化技术在光信息处理和光通讯机两个方面的应用尤为显著，特别是其中的大存储、高速度、高可靠性、长寿命、低成本光盘的开发以及液晶平板式显示器、光局域网络的研制生产，都是光机电一体化产品的典型开发实例。

### 1.4.2 光机电一体化产品的特点

与传统的机械产品比较，光机电一体化产品具有结构简单、功能多、效率高、精度高、能耗低的特点，集中体现在以下几个方面：

（1）提高性能、改善操作　在原有的机械产品中增加了信息处理装置及相应的应用软件，来替代原有产品的部分机械控制机构，不仅提高了自动化程度，而且能大大提高产品质量，降低生产成本，提高经济效益。例如，数控机床能准确地按事先安排好的工艺流程，自动地实现高精度、高效率加工，可有效地提高生产效率和加工精度，数控加工时还可以充分发挥计算机的威力，运用时间序列分析和精度创成等理论建立数学模型，实时预报包括随机误差在内的机床误差，然后自动校正，从而达到很高的精度；如采用对阻尼进行预报，一旦接近临界值时就自动调整切削用量，这又可能出现永不颤振的机床，保证很高的生产效率和良好的加工表面。光机电一体化产品采用新型器件和装置，可代替笨重而复杂的机械或电子装置，如光盘驱动器、条形码阅读器、图像传感器和激光印刷机等产品，都是利用光学读出和读入部件代替了电气和机械的部件。

（2）简化结构、减轻重量　光机电一体化产品不仅结构简单，从而减轻了重量，而且功能增强，精度提高。如微处理器控制装置可方便地完成过去靠机械传动链和机构实现的关联运动，使机械结构简化、体积减少、重量减轻，不仅提高了自动化程度，而且能大大提高产品质量。

（3）扩展功能、改善操作　在光机电一体化产品机构中，机械是基础，电气为运转载体，而光则是代表着先进科技，如有“头脑”的机器、会说话的机器、具有口和耳朵功能的机器等；而静电复印机、彩色印像机等则是由机、电、光、磁、化学等多种学科和技术复合创新的具有多种功能、智能化的高新技术产品。

（4）节约能源、减少材耗　各类电风扇如将其电磁机械式调速器和定时器改由电子调速器和定时器代替，估计每台风扇使用时不仅可节电5W以上，还可节省大批铜材和钢材。再如传统的电焊机以电磁原理和手工操作为基础，即使是一般的自动电焊机，其动作过程也仅为简单的机械动作和相应的控制。这类电焊机耗能多、效率低、质量不易保证。采用微型机技术后，发展新颖的电子控制电源以取代传统的焊接电源，实现焊接电源的节能、高效、小形化、多样化。

### 1.4.3 光机电一体化技术领域的优先发展产品

根据国家重点新产品计划，光机电一体化技术领域的产品包括五大类：①先进制造技术设备，②机电一体化机械设备，③机电基础件，④仪器仪表，⑤监控设备及控制系统。光机电一体化技术领域的优先发展产品见表1-1。表中的优先性是专家对各个

产品的重要性评分，将其分为 1 ~ 4 档，“1” 档为最优。

表 1-1　光机电一体化技术领域的优先发展产品

| 先进制造技术设备 | 优先性 |
| --- | --- |
| 1. 检测、传感元件及产品 | 1 |
| 2. 传动基础元件及产品 | 2 |
| 3. 伺服控制系统及中高档数控系统 | 1 |
| 4. 光电控制系统 | 2 |
| 5. 力、视觉系统技术产品 | 2 |
| 6. 其他工业机器人产品 | 1 |
| 7. 柔性制造单元（FMC） | 3 |
| 8. 新型数显装置 | 3 |
| 9. 高性能数控机床（三轴以上联动） | 2 |
| 10. 变频调速装置 | 2 |
| 11. 精密成形加工技术产品 | 2 |
| 12. 其他柔性制造系统（FMS）产品 | 3 |
| 13. 高性能材料表面处理及改性设备 | 2 |
| 14. 微电脑控制的机械设备 | 2 |
| 15. 机械产品开发用先进计算机软硬件产品 | 2 |
| 16. 智能化的电器设备 | 3 |
| 17. 智能化的电力设备 | 3 |
| 18. 树脂砂铸造设备（20t/h 以上） | 4 |
| 19. 先进模具设计、制造设备 | 1 |
| 20. 大型真空电子束焊设备 | 4 |
| 21. 可控气氛及真空热处理设备 | 3 |
| 22. 新型的激光加工设备 | 2 |
| 23. 波长可调的强激光设备 | 3 |
| 24. 激光脉冲功率技术设备 | 3 |
| 25. 等离子技术设备 | 3 |
| 机电基础件 | 优先性 |
| 1. 高性能的机械基础件 | 1 |
| 2. 新型低压、高压电器 | 2 |
| 3. 新型大功率电源 | 3 |
| 4. 高速、超硬精密模具及新型量具、刃具 | 2 |
| 5. 新型专用泵、阀 | 2 |
| 6. 新型液压、密封、气动元器件 | 1 |
| 7. 电子式低压电器 | 3 |

（续）

| 机电基础件 | 优先性 |
| --- | --- |
| 8. 高强度异形紧固件 | 2 |
| 机电一体化机械设备 | 优先性 |
| 1. 塑料机械 | 3 |
| 2. 纺织机械 | 3 |
| 3. 包装机械 | 3 |
| 4. 造纸机械 | 3 |
| 5. 其他机电一体化的轻工机械设备 | 3 |
| 6. 新型的电力、石油、化工设备、合成材料加工设备 | 2 |
| 7. 特种运输车 | 3 |
| 8. 新型船舶等先进交通运输设备 | 2 |
| 9. 高性能汽车电子装置及汽车关键零部件 | 2 |
| 10. 其他机电一体化的重工机械设备 | 2 |
| 仪器仪表 | 优先性 |
| 1. 新型工业自动化仪表 | 2 |
| 2. 高性能分析仪器 | 3 |
| 3. 高性能信号记录仪器 | 2 |
| 4. 新型测量、计量仪器 | 3 |
| 5. 新型实验机与模拟仪器 | 3 |
| 6. 光电参量传感仪器 | 1 |
| 7. 高精度新型传感器 | 1 |
| 8. 先进摄影器材及缩微系统 | 3 |
| 9. 微机夜视及热像仪 | 3 |
| 10. 电镜 | 4 |
| 监控设备及控制系统 | 优先性 |
| 1. 中高档可编程序控制器 | 1 |
| 2. 集散控制系统 | 2 |
| 3. 分布式控制系统 | 2 |
| 4. 工业生产过程自动控制系统 | 1 |
| 5. 大电流断流容量试验及变压器突发短路试验 | 3 |
| 6. 在线自动测试系统 | 1 |
| 7. 电力调度与管理自动化系统 | 2 |
| 8. 安全检测及控制系统 | 2 |
| 9. 光电检测和探测技术设备 | 2 |
| 10. 智能化自动识别系统 | 3 |

## 1.5　光机电一体化技术的发展方向

光机电一体化是光学、微电子、机械、控制、计算机、信息处理等多学科的交叉融合，其发展和进步有赖于相关技术的发展和进步，其主要发展方向有数字化、智能化、模块化、网络化、人性化、微型化、集成化、带源化和绿色化。

（1）数字化　微处理器和微控制器的发展奠定了单机数字化的基础，如不断发展的数控机床和机器人。而计算机网络的迅速崛起，为数字化制造铺平了道路，如计算机集成制造。数字化要求光机电一体化产品的软件具有高可靠性和可维护性及自诊断能力，其人机界面对用户更加友好，易于使用，并且用户能根据需要参与改进。数字化的实现将便于远程操作、诊断和修复。产品的虚拟设计与制造将大大提高设计制造的效率，节省开发费用。

（2）智能化　赋予光机电产品一定的智能，使它具有人的判断推理、逻辑思考、自主决策等能力。例如，在 CNC 数控机床上增加了人机对话功能，设置了智能 I/O 通道和智能工艺数据库，给使用、操作和维护带来了极大的方便。人工智能技术、神经网络技术及光纤技术等领域取得的巨大进步，为光机电一体化技术开辟了发展的广阔天地，大量的智能化光机电一体化产品不断涌现。现在，“模糊”控制技术已经相当普遍，甚至还出现了“混沌”控制的产品。

（3）模块化　由于光机电一体化产品种类和生产厂家繁多，研制和开发具有标准机械接口、动力接口、环境接口的光机电一体化产品单元是一项复杂和有前途的工作。例如研制具有集减速、智能调速、电动机于一体的动力装置单元，具有视觉、图像处理、识别和测距等功能的控制单元，以及能完成典型操作的装置，可以利用标准单元迅速开发出新产品。同时也可扩大生产规模，这需要制定各项标准，以便各部件、单元的匹配和接口。光机电一体化产品模块化的发展促进了新产品的开发，品种不断增多，花样不断翻新，缩短了开发周期。以驱动为核心的驱动模块单元，以伺服为核心的运动控制模块单元，以两根导线把各功能单元连接起来的总线或现场总线等，已形成了标准化的产品。

（4）网络化　由于网络的普及，基于网络的各种远程控制和监视技术方兴未艾。而远程控制的终端设备本身就是光机电一体化产品，现场总线和局域网技术使家用电器网络化成为可能，利用家庭网络连接各种家用电器形成以计算机为中心的计算机集成家用电器系统，使人们在家里充分享受各种高技术带来的好处。因此，光机电一体化产品无疑应朝网络化方向发展。

（5）人性化　光机电一体化产品的最终使用对象是人，如何在光机电一体化产品里赋予人的智能、情感和人性显得愈来愈重要。光机电一体化产品除了完善的性能外，还要求在色彩、造型等方面都与环境相协调，柔和一体，小巧玲珑。使用这些产品，对人来说还是一种艺术享受，如家用机器人的最高境界就是人机一体化。

（6）微型化　微型化是精细加工技术发展的必然，也是提高效率的需要。微机电系统（Micro Electronic-Mechanical Systems，MEMS）是指可批量制作的，集微型机构、

微型传感器、微型执行器，以及信号处理和控制电路，直至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统。自 1986 年美国斯坦福大学研制出第一个医用微探针，1988 年美国加州大学 Berkeley 分校研制出第一个直径为 200μm 的微电机以来，国内外在 MEMS 工艺、材料及微观机理研究方面取得了很大进展，开发出各种 MEMS 器件和系统，如各种微型传感器——微压力传感器、微加速度计、微触觉传感器，各种微构件——微膜、微梁、微探针、微连杆、微齿轮、微轴承、微泵、微弹簧及微机器人等。最近几年来，MEMS 正在向光学方面渗透，形成了微光机电系统（Micro Opto-Electronic-Mechanical Systems，MOEMS）。其研究的目标是试图实现光机电系统的微小化、集成化和智能化，设计制造出具有新原理、新结构、新功能的元件及系统，开辟一个新的工程技术领域，完成传统的机电系统所不能完成的任务。所以，微光机电系统是涉及电子学（微电子和控制）、机械学（机械和力学）、光学、材料学、化学、生物学和医学等多学科、高技术交叉的前沿研究领域。微光机电系统可以是一种外形尺寸很小的微系统/微运动系统，或是一种外形尺寸未必很小，但操作尺度极小且精度很高的微动作系统。它们的尺寸大小一般泛指从数厘米到数微米的范围，通常把尺寸为 1～100mm 的称为小型系统；0.1～1mm 称为毫米系统；1～100μm 称为微米系统。所以，微小化是微光机电系统的重要特征。由于其尺度的微小化，即所谓尺寸效应将导致许多适用于宏观技术领域的经验与法则往往不能发挥作用，需要从微观领域来对设计、结构、材料、制造、测试、控制、集成、能源及通信等方面进行研讨，探讨新原理，开发新技术、新功能元件和系统，确立崭新的“微理工学”和“微系统设计方法论”。目前，在世界范围内所研制的微光机电系统主要包括空间光调制器、光盘读取头、微机械光开关、光衰减器、光扫描器及光谱仪等。其中微机械光开关具有串话小、插入损耗小、消光比高，对波长和偏振不敏感，且稳定性好、造价低等优点，在光纤通信和光纤测试系统中具有广阔的应用前景。

（7）集成化　集成化既包含各种技术的相互渗透、相互融合和各种产品不同结构的优化与复合，又包含在生产过程中同时处理加工、装配、检测、管理等多种工序。为了实现多品种，小批量生产的自动化与高效率，应使系统具有更广泛的柔性。首先可将系统分解为若干层次，使系统功能分散，并使各部分协调而又安全地运转，然后再通过硬、软件将各个层次有机地联系起来，使其性能最优、功能最强。

（8）带源化　是指光机电一体化产品自身带有能源，无需外部供电。能源一直是研究的重点，如太阳能电池、燃料电池和大容量电池。但在许多场合无法使用电能。而对于运动的光机电一体化产品，自带动力源具有独特的好处。带源化是光机电一体化产品的发展方向之一。

（9）绿色化　科学技术的发展给人们生活带来巨大变化，物质丰富的同时也带来资源减少，生态环境恶化的后果。所以人们呼唤保护环境，回归自然，实现可持续发展。绿色产品概念在这种呼声中应运而生。绿色产品是指低能耗、低材耗、低污染，舒适、协调而可再生利用的产品，在其设计、制造、使用和销毁时应符合环保和人类健康的要求。光机电一体化产品的绿色化主要是指在其使用时不污染生态环境，产品寿命结束时，产品残存部分的可分解和可再生利用。

# 第 2 章　在设计方面的应用技术与产品

## 2.1　计算机仿真技术

### 2.1.1　概述

仿真（Simulation）是对现实系统的某一层次抽象属性的模仿。人们利用仿真模型进行试验，从中得到所需的信息，然后帮助人们对现实世界的某一层次的问题做出决策。计算机仿真技术是利用计算机科学和技术的成果建立被仿真的系统的模型，并在某些实验条件下对模型进行动态实验的一门综合性技术。

计算机仿真技术的发展与控制工程、系统工程及计算机工程的发展有着密切的联系。一方面，控制工程、系统工程的发展，促进了仿真技术的广泛应用；另一方面，计算机的出现及计算机技术的发展，又为仿真技术的发展提供了强大的支撑。计算机仿真一直作为一种必不可少的工具，在减少损失、节约经费开支、缩短开发周期、提高产品质量等方面发挥着重要的作用。

从本质上讲，仿真技术就是建立仿真模型和对模型进行实验的一种技术。计算机仿真过程的实现一般都可由计算机高级语言、仿真语言和仿真软件来完成。如图 2-1 所示，典型的仿真软件有仿真环境、仿真语言和程序包三种形式，其功能覆盖是不完全相同的。从下到上，大体反映了仿真软件的发展过程。到 20 世纪 80 年代中后期，开始出现了一体化仿真环境。现在，面向制造系统的仿真，出现了一体化支撑软件，实现了仿真建模、仿真运行、输出分析的集成环境；仿真监控运用了并发执行机制，在数据库管理的基础上实现了模型数据、实验数据、仿真结果的统一管理；人工智能技术也应用在仿真建模、仿真运行和仿真结果的分析中。此外，广义制造系统仿真器的出现，实现了对某类制造系统的非语言建模、模型数据驱动等功能。

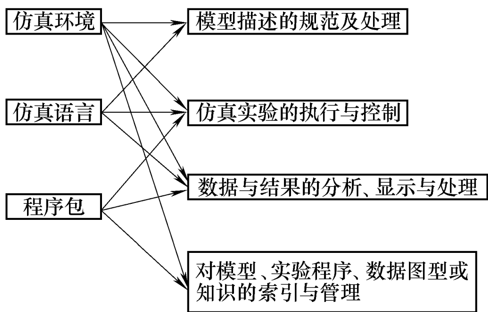



图 2-1　计算机仿真过程的实现

### 2.1.2　计算机仿真技术的特点

计算机仿真具有高效、安全，受环境条件的约束较少，可改变时间比例尺等优点，已成为分析、设计、运行、评价、培训系统（尤其是复杂系统）的重要工具。

### 2.1.3 计算机仿真技术的应用

随着全球性的市场竞争日益激烈，产品消费结构不断向多元化、个性化方向发展，产品的更新期和交货期缩短，一些先进制造技术如 CAD、CAM、CAPP、NC、FMS、MRPⅡ及 CIMS 都得到快速发展。计算机仿真作为一种重要手段，已经渗透到上述技术当中去，并帮助它们实现集成。在 20 世纪 50 年代，最引人注目的仿真领域是火炮控制和飞行控制系统；20 世纪 60 年代，是火箭和导弹控制系统；20 世纪 70 年代是航天、核能和经济管理系统；到 20 世纪 80 年代，最引人注目的仿真领域就逐步转向了制造系统，并且呈现出一种生机勃勃的局面。

自从 20 世纪 80 年代以来，系统仿真不断朝前发展，在制造业方面，一个比较明显的进展就是“虚拟制造”。根据虚拟制造的概念，整个产品的设计和制造首先在计算机上进行，这样可以及时发现并解决该产品在制造之前可能出现的各种问题。利用本章下一节介绍的虚拟现实技术的高级人机交互作用特性，可以对产品的各个阶段提供支持。例如，在虚拟环境下设计产品及其生产流水线，测试和装配产品的零部件，客户可以验证产品是否符合要求等。美国波音公司的波音—777 飞机的研制、生产做到完全“无图纸”程度。整机设计、装配、部件测试以及各种试飞的研制，都是由计算机完成的。虚拟制造将开发周期从原来的 8 年缩短到 5 年，节约了数百万美元经费。

近年来，计算机仿真技术在制造业应用的另一个研究热点——虚拟产品开发，也是引人注目的。虚拟产品开发是对产品设计及其相关过程（制造过程、使用过程和支持过程）进行并行的、一体化设计的一种系统化工作模式。在产品开发一开始就考虑到投资、生产制造、装配、销售和维护及报废等产品的整个生命周期的所有因素，形成一个虚拟产品开发环境，使产品开发人员能够在这种环境下策划产品、设计产品、预测产品在真实环境下的性能、特征及真实工况下所具有的响应，从而减少反复和变更的次数，减少甚至取消制作物理原型样机，如此就能很好地检验设计、指导和优化设计，有效地缩短产品的开发周期，大量节省开发费用，产生巨大的经济效益。

现在，仿真技术的应用已经从单一系统走向开放复杂的大系统。当仿真对象分布于广阔的时空领域，仿真任务要求将不同地理位置、不同类型（包括人在内）的仿真对象构成一个统一整体进行仿真时，产生了分布交互化仿真。这种仿真系统里包含有不同类型的实体－虚体、真实实体和构造实体，这些实体可以基于不同目的系统、不同年代的技术、不同厂商的产品和不同产品组成，并允许它们交互操作。分布交互化仿真实现用计算机网络将不同地点的仿真设备连接起来，通过实体间的数据交换，构成时空到合成仿真环境的一种先进仿真技术。在这种复杂的分布综合的系统进行实时仿真时，必须提供快速、高效、大量的信息通道和相应的处理。

围绕产品从概念设计到终止使用的整个生命周期，再从决策者、设计师、制造商、销售商和用户等全方位地去观察和研究产品，仿真技术已显示出它强大的生命力和发展潜力。面向 21 世纪，同其他领域一样，制造领域的仿真技术的仿真规模正在不断地扩大，仿真功能也在不断地朝智能化、可视化、集成化、并行化、分布交互化的方向发展。

## 2.2　逆向工程技术

### 2.2.1　概述

工业产品的形状大致可分为两类。一类仅由平面、圆柱面、圆锥面和球面等初等解析曲面组成，它们可以用画法几何与机械制图完整、清楚地表达与传递所包含的长度、高度和半径等形状信息，在计算机三维表示中，可以通过特征参数实体间的布尔运算来表示，大多数机械零件属于这一类。另一类是以复杂方式自由变化的曲线曲面，它们不能单纯用画法几何与机械制图来完整而准确地表达，对于这类自由曲线曲面，传统上采用模线样板法表示。设计者用均匀的带弹性的细木条或金属条，通过一系列点绘制得到的曲线即模线，在曲面上没有模线控制的部分取成光滑过度。这种采用模拟量传递的设计制造方法所表示与传递的形状不仅因人而异，而且即使是同一设计人员针对同一组数据点，得到的曲线也可能不完全一样。所以，设计与制造人员即使耗费大量的时间也无法得到精确而统一的模型，不利于产品的分析、归纳和进一步优化开发借鉴。该方法使得产品加工依赖于得到的模型，而模型的制作需加工人员多次修配和反复实验，因而制造周期长，加工成本高，而且制造精度低，互换协调性差。为充分利用已有产品的优良几何特性和机械结构，在设计和加工这类产品时，多采用逆向工程（Reverse Engineering，RE）技术。

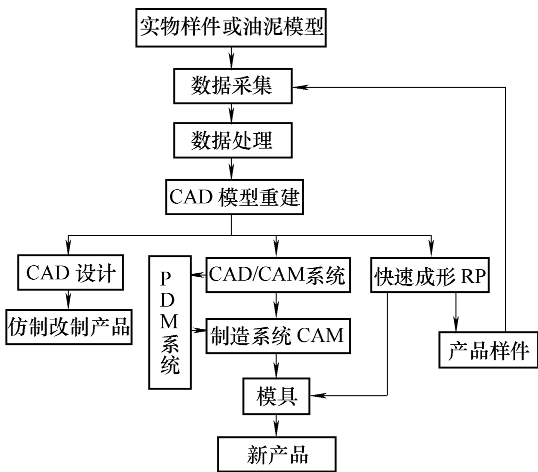



图 2-2　逆向工程流程图

逆向工程也称为反求工程、反向工程等。广义的逆向工程是一个复杂的系统工程，包括几何形状逆向、工艺逆向和材料逆向等诸多方面。一般的逆向工程也称为几何逆向，是指在没有设计图样或者设计图样不完整的情况下，按照现有零件的模型（产品原型或油泥模型），利用各种数字化技术及 CAD 技术重新构造模型而克隆或创造实物产品的过程。图 2-2 所示为逆向工程流程图。逆向工程中的关键技术是数据采集、数据处理和模型的重建。

### 2.2.2　逆向工程的应用

逆向工程技术并不是简单意义的仿制，而是综合运用现代工业设计的理论方法、工程学、材料学和相关的专业知识，进行系统分析，进而快速开发制造出高附加值、高技术水平的新产品。主要应用于已有的零件的复制，或者是损坏、磨损件的高精度

复原，数字化模型检测等。

目前应用逆向工程进行产品设计主要有两种方式：

1）由设计师、美工师事先设计好产品的油泥或木制模型，由坐标测量机将模型的数据扫入，再建立计算机模型，如汽车外形覆盖件。

2）针对已有的产品实物零件，也就是常说的仿制。仿制是一种最低层次的逆向工程。应该在该模型的基础上，应用 CAE 软件对其进行结构性能分析，设计模型重构，再设计优化与制造，以获得一个与前面产品对象不完全相同，甚至完全不同的新的结构外形，最终达到产品设计创新的目的。逆向工程的创新设计过程如图 2-3 所示。

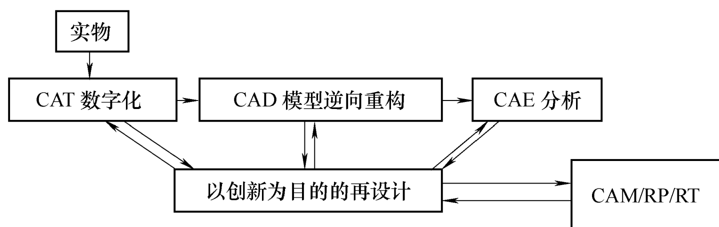



图 2-3　逆向工程创新设计过程

对具有复杂外形的产品的开发，利用逆向工程技术，可以根据多种数据来源（三维测量、图像、CT 等），重构出实物的 CAD 模型，然后转换成 STL 文件和 NC 代码。而对简单零件，在完全仿制的情况下，也可以不建立 CAD 模型，由测量数据直接生成 STL 文件和 NC 代码，如图 2-4 所示。

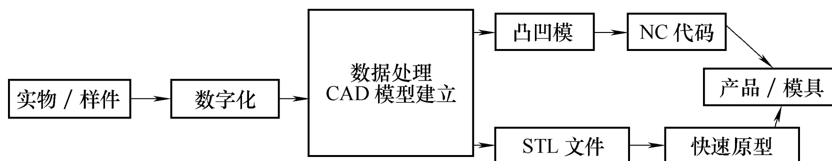



图 2-4　由测量数据直接生成 STL 文件和 NC 代码过程

## 2.2.3　三坐标测量机

三坐标测量机（Coordinate Measuring Machining，CMM）是一种新型高效的精密测量仪器。电子技术、计算机技术、数字控制技术及精密加工技术的发展为三坐标测量机的产生提供了技术基础，它可以满足自动机床、数控机床高效率加工以及越来越多复杂形状零件加工需要有快速可靠的测量设备的需要。现代三坐标测量机不仅能在计算机控制下完成各种复杂测量，而且可以通过与数控机床交换信息，实现对加工的控制，并且还可以根据测量数据，实现反求工程。目前，三坐标测量机已广泛用于机械制造业、汽车工业、电子工业、航空航天工业和国防工业等各部门，成为现代工业检测和质量控制不可缺少的万能测量设备。

**1. 三坐标测量机的组成**

三坐标测量机是典型的机电一体化设备，它由机械系统和电子系统两大部分组成。图 2-5 为三坐标测量机的组成示意图。

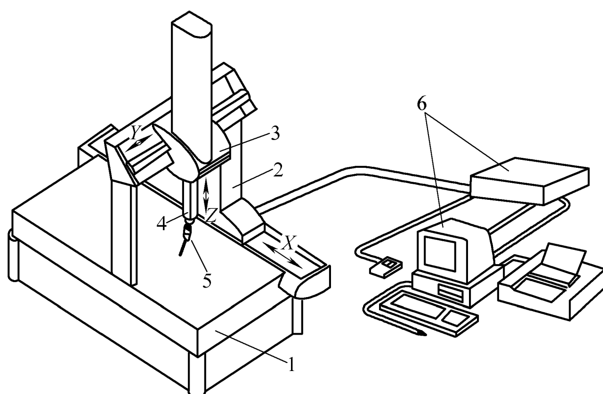



图 2-5　三坐标测量机的组成
1—工作台　2—移动桥架　3—中央滑架
4—Z 轴　5—测头　6—电子系统

1）机械系统。一般由三个正交的直线运动轴构成。如图 2-5 所示结构中，X 向导轨系统装在工作台上，移动桥架横梁是 Y 向导轨系统，Z 向导轨系统装在中央滑架内。三个方向轴上均装有光栅尺用以度量各轴位移值。人工驱动的手轮及机动、数控驱动的电动机一般都在各轴附近，用来触测被检测零件表面的测头装在 Z 轴端部。

2）电子系统。一般由光栅计数系统、测头信号接口和计算机等组成，用于获得被测坐标点数据，并对数据进行处理。

**2. 三坐标测量机的工作原理**

三坐标测量机是基于坐标测量的通用化数字测量设备。它首先将各被测几何元素的测量转化为对这些几何元素上一些点集坐标位置的测量，在测得这些点的坐标位置后，再根据这些点的空间坐标值，经过数学运算求出其尺寸和形位误差。如图 2-6 所示，要测量工件上一圆柱孔的直径，可以在垂直于孔轴线的截面Ⅰ内，触测内孔壁上三个点（点 1、2、3），根据这三点的坐标值就可计算出孔的直径及圆心坐标 $O_{\mathrm{I}}$；如果在该截面内触测更多的点（点 1，2，…，n，n 为测点数），则可根据最小二乘法或最小条件法计算出该截面圆的圆度误差；如果对多个垂直于孔轴线的截面圆（Ⅰ，Ⅱ，…，m，m 为测量的截面圆数）进行测量，则根据测得点的坐标值可计算出孔的圆柱度误差及各截面圆的圆心坐标，再根据各圆心坐标值又可计算出孔轴线位置；如果再在孔端面 A 上触测三点，则可计算出孔轴线对端面的位置度误差。由此可见，三坐标测量机的这一工作原理使得其具有很大的通用性和柔性。从原理上来说，它可以测量任何工件的任何几何元素的任何

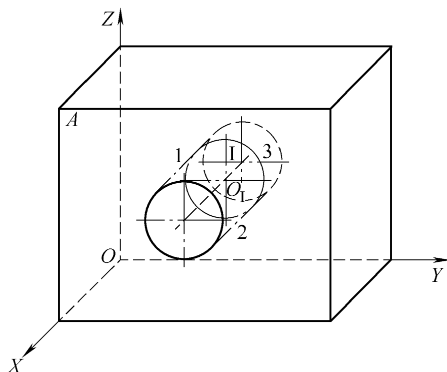



图 2-6　坐标测量原理

参数。

**3. 三坐标测量机的分类**

（1）按三坐标测量机的技术水平分类

1）数字显示及打印型。这类三坐标测量机主要用于几何尺寸测量，可显示并打印出测得点的坐标数据，但要获得所需的几何尺寸形位误差，还需进行人工运算，其技术水平较低，目前已基本被陶汰。

2）带有计算机进行数据处理型。这类三坐标测量机技术水平略高，目前应用较多。其测量仍为手动或机动，但用计算机处理测量数据，可完成诸如工件安装倾斜的自动校正计算、坐标变换、孔心距计算、偏差值计算等数据处理工作。

3）计算机数字控制型。这类三坐标测量机技术水平较高，可像数控机床一样，按照编制好的程序自动测量。

（2）按三坐标测量机的测量范围分类

1）小型坐标测量机。这类三坐标测量机在其最长一个坐标轴方向（一般为 $X$ 轴方向）上的测量范围小于 500mm，主要用于小型精密模具、工具和刀具等的测量。

2）中型坐标测量机。这类三坐标测量机在其最长一个坐标轴方向上的测量范围为 500～2000mm，是应用最多的机型，主要用于箱体、模具类零件的测量。

3）大型坐标测量机。这类三坐标测量机在其最长一个坐标轴方向上的测量范围大于 2000mm，主要用于汽车与发动机外壳、航空发动机叶片等大型零件的测量。

（3）按三坐标测量机的精度分类

1）精密型三坐标测量机。其单轴最大测量不确定度小于 $1\times10-6L$（$L$ 为最大量程，单位为 mm），空间最大测量不确定度小于（2～3）$\times10-6L$，一般放在具有恒温条件的计量室内，用于精密测量。

2）中、低精度三坐标测量机。低精度三坐标测量机的单轴最大测量不确定度大体在 $1\times10-4L$ 左右，空间最大测量不确定度为（2～3）$\times10-4L$；中等精度三坐标测量机的单轴最大测量不确定度约为 $1\times10-5L$，空间最大测量不确定度为（2～3）$\times10-5L$。这类 CMM 一般放在生产车间内，用于生产过程检测。

（4）按三坐标测量机的结构形式分类　按照结构形式，三坐标测量机可分为移动桥式、固定桥式、龙门式、悬臂式、立柱式等。

## 2.2.4　三维激光扫描仪

三维激光扫描仪（3D Laser Scanner）是一种高性能的三维扫描设备，通过激光测距原理，瞬时非接触式测得测量对象三维坐标值。结合使用计算机视觉技术、计算机及微软视窗操作系统，具有扫描速度快、精度较高等特点，可广泛用于逆向工程设计、快速成形应用、零件质量测量等方面。

**1. 三维激光扫描仪的组成**

三维激光扫描仪的基本组件包括计算机控制系统，扫描头组件，数控转台，$X$、$Y$、$Z$ 轴运动组件，控制机柜和操作台，如图 2-7 所示。

**2. 三维激光扫描仪工作原理**

三维激光扫描仪向目标发射激光脉冲，采用仪器坐标系下的三维空间点组成的点云图来表达对目标采样的结果。三维激光扫描系统通过内置伺服驱动电动机系统精密控制多面反射棱镜的转动，使脉冲激光束沿横轴方向和纵轴方向快速扫描，快速获得测量目标的三维坐标和反射强度。三维激光扫描仪所获得的原始观测数据的主要是根据 2 个连续转动的用来反射脉冲激光的镜子的角度值得到的激光束的水平方向值和竖直方向值；根据脉冲激光传播的时间计算得到的仪器到扫描点的距离值。前两种数据用来计算扫描点的三维坐标值，扫描点的反射强度则用来给反射点匹配颜色。三维激光扫描仪工作原理图如图 2-8 所示。



图 2-7　LSG300 三维激光扫描仪

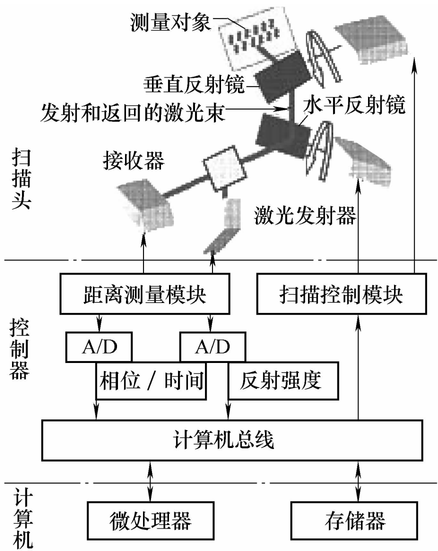



图 2-8　三维激光扫描仪工作原理图

**3. 三维激光扫描仪的测量过程**

1）系统校正。归零，系统零位设置，校正平行，校正镜头，校正激光，校正 R 轴，保存。

2）扫描。准备工作，设置路径，开始扫描。

3）3D 数据处理。输出数据，后处理。

**4. 三维激光扫描技术的特点**

1）非接触式测量。可以测量柔软、薄工件及不可接触的工件，大型物体分块测量、自动拼合。

2）三维测量。传统测量所测的数据最终输出的都是二维结果，如 CAD 图。在逐步数字化的今天，三维已经逐渐的代替二维。现在的三维激光扫描仪每次测量的数据不仅仅包含 $X$、$Y$、$Z$ 点的信息，还包括 R、G、B 颜色信息，同时还有物体反色率的信息，这样全面的信息能给人一种物体在电脑里真实再现的感觉，是一般测量手段无法做到的，如图 2-9 所示。

3）扫描速度快。在常规测量手段里，每一点的测量费时都在 2～5s 不等，甚至更



图 2-9　Mephisto 三维扫描仪的未处理扫描图

高。而三维激光扫描仪的扫描速度可达到 5000～10000 点/s。

4）扫描精度高。可达 0.02～0.05mm。

5）扫描景深可达到 60～100mm，配合精密控制的四轴系统（三轴平动一轴转动），可以实现对各种凸凹物体的 360 度精密测量，扫描数据自动拼接，操作简便。

6）应用领域广泛。三维激光扫描仪已经成功地在文物保护、城市建筑测量、地形测绘、采矿业、变形监测、工厂、大型结构、管道设计、飞机船舶制造、公路铁路建设、隧道工程、桥梁改建等领域里应用。

**5. 应用**

1）逆向工程。为后续市场产品设计提供所需的速度、精确度和易用性。

2）包装设计。通过扫描产品样品，获得精确的几何形状和质地数据，从而用于设计定制包装。

3）人机工程学设计。轻松扫描手工制作样品，从零开始，制作出复杂的设计方案。

4）数字化存档。通过将刀具、样品和原型以数字化方式存储下来，节约仓储成本。

5）数字化媒体、游戏和动画。根据艺术家的概念模型创建生成计算机游戏和电影用的数字媒体。

6）传承艺术和文化遗产。生成对艺术和文化遗产影响度很低的高分辨率扫描图像，精确地复原和重建珍贵无比的艺术珍品和建筑杰作。记录、研究，甚至复制杰出艺术作品，用于转运、包装博物馆商品及历史存档。利用三维扫描仪进行文物无损扫描，数字网格优化整理，再修补文物数字模型，纹理贴图优化处理。最后用三维浏览软件进行全方位控制观看。分别如图 2-10～图 2-15 所示。

7）医学教育。创建复杂器官和骨骼结构的高度仿真复制品。

8）医学矫形。定制设计支架和其他装置，提供精密的舒适度。



图 2-10　文物三维扫描



图 2-11　对实物进行全方位拍照

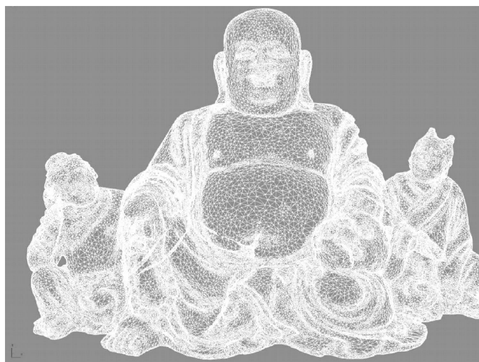


图 2-12　点云数据生成矢量网格

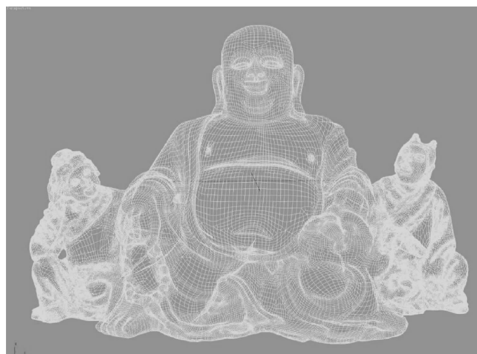


图 2-13　三维网格线优化



图 2-14　表面降噪、光滑处理



图 2-15　纹理匹配三维模型

## 2.3 虚拟现实技术

虚拟现实技术（Virtual Reality，VR）是在计算机图形学、计算机仿真技术、人机接口技术、多媒体技术及传感技术的基础上发展起来的交叉学科，是利用人工智能、计算机图形学、人机接口、多媒体、计算机网络，以及电子、机械、视听等高新技术，模拟人在特定环境中的视、听、动等行为的高级人机交互技术。虚拟现实是人们通过计算机对复杂数据进行可视化操作与交互的一种全新方式，与传统的人机界面及流行的视窗操作相比，虚拟现实在技术思想上有了质的飞跃。

虚拟现实中的“现实”是泛指在物理意义上或功能意义上存在于世界上的任何事物或环境，它可以是实际上可实现的，也可以是实际上难以实现的或根本无法实现的。而“虚拟”是指用计算机生成的意思。因此，虚拟现实是指用计算机生成的一种特殊环境，人可以通过使用各种特殊装置将自己“投射”到这个环境中，并操作、控制环境，实现特殊的目的，即人是这种环境的主宰。

### 2.3.1 虚拟现实技术的体系结构和特征

从技术的角度来说，虚拟现实系统具有三个基本特征，即沉浸（immersion）、交互（interaction）、构想（imagination）。它强调了在虚拟系统中，人发挥着主导作用，从过去只能从计算机系统的外部去观测处理的结果，到能够沉浸到计算机系统所创建的环境中，从过去只能通过键盘、鼠标与计算环境中的单维数字信息发生作用，到能够用多种传感器与多维信息的环境发生交互作用，从过去的只能以定量计算为主的结果中启发从而加深对事物的认识，到有可能从定性和定量综合集成的环境中得到感知和理性的认识，从而深化概念和萌发新意。

虚拟环境技术的体系结构可以用图 2-16 所示的 3 个 I 的“三角形”来表示，所谓的 3 个 I，是指 Immersion、Interaction、Imagination，即沉浸、交互、构想。这 3 个 I 是 VR 系统的 3 个基本特征。

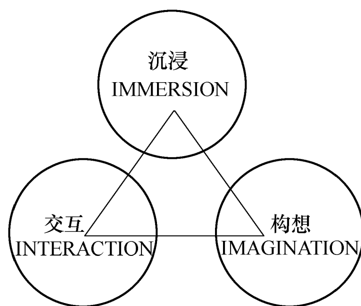



图 2-16　3I“三角形”

从本质上来说，虚拟现实就是一种先进的计算机用户接口，它通过给用户同时提供诸如视觉、听觉、触觉等各种直观而又自然的实时感知交互手段，最大限度地方便用户的操作。根据虚拟现实技术所应用的对象不同，其作用可表现为不同的形式，例如，将某种概念设计或构思可视化和可操作化，实现逼真的遥控现场效果，达到任意复杂环境下的廉价模拟训练目的等。

### 2.3.2 虚拟现实系统的组成

虚拟现实系统由输入部分、输出部分、虚拟环境数据库、虚拟现实软件组成。

**1. 输入部分**

虚拟现实系统通过输入部分接收来自用户的信息。用户基本输入信号包括用户的头、手位置及方向、声音等。其输入设备主要有：

（1）数据手套　用来监测手的姿态。如图 2-17 所示的数据手套是一种将人手的自然动作数字化的多模式虚拟设备。通过软件编程，可进行虚拟场景中物体的抓取、移动、旋转等动作，也可以利用它的多模式性，用作一种控制场景漫游的工具。



图 2-17　数据手套

观察者还可借助数据手套等设备来操纵虚拟场景中的对象，数据手套中装有许多光纤传感器，能够感知手指关节的弯曲状态。观察者通过手指的活动来实现与虚拟场景的相互作用。数据手套是一种多模式的虚拟现实硬件。数据手套的出现，为虚拟现实系统提供了一种全新的交互手段，目前的产品已经能够检测手指的弯曲，并利用磁定位传感器来精确地定位出手在三维空间中的位置。这种结合手指弯曲度测试和空间定位测试的数据手套被称为“真实手套”，可以为用户提供一种非常真实自然的三维交互手段。在虚拟装配和医疗手术模拟中，数据手套是不可缺少的虚拟现实硬件的一个组成部分，其使用如图 2-18 所示。




图 2-18　数据手套的使用

（2）三维空间交互球　用于物体操作和飞行控制。三维空间交互球是虚拟现实应用中的另一重要的交互设备，用于六个自由度 VR 场景的模拟交互，可从不同的角度和

方位对三维物体观察、浏览、操纵；也可作为 3D 鼠标来使用；并可与数据手套或立体眼镜结合使用，作为跟踪定位器。也可单独用于 CAD/CAM 系统（如 Pro/E、UG 等）。图 2-19 为三维空间交互球。

（3）自由度鼠标　用于导航、选择及与物体交互。

（4）生物传感器　用来跟踪眼球运动。

（5）头部跟踪器　通常安装在 HMD 头盔上跟踪头部位置，以便使 HMD 显示的图像随头部运动而变化。用户头的位置及方向是系统重要的输入信号，因为它决定了从哪个视角对虚拟世界进行渲染。



图 2-19　三维空间交互球

（6）语音输入设备　通过话筒等声音输入设备将语音信息输入，并利用语音识别系统将语音信号变成数字化信号。

**2. 输出系统**

虚拟现实系统根据人的感觉器官的工作原理，通过虚拟现实系统的输出设备，使人对虚拟现实系统的虚拟环境得到虽假犹真、身临其境的感觉。主要是由三维图像视觉效果、三维声音效果和触觉（力觉）效果来实现的。

（1）三维图像生成与显示　利用图形处理器、立体图像显示设备、高性能计算机系统将计算机数字信号变成三维图像。最简单的一种是如图 2-20 所示的计算机监视器加上一副眼镜，另一种就是头盔显示器，如图 2-21 所示。

三维眼镜是用于观看立体游戏场景、立体电影、仿真效果的计算机装置，是基于页交换模式的虚拟现实立体眼镜，分有线和无线两种，是目前最为流行和经济适用的 VR 观察设备。





图 2-20　计算机监视器和立体眼镜

（2）三维声音处理　虚拟现实系统声音效果包括音响和语音效果。通过有关的声音设备使电子信号变成立体声，并提供识别立体声声源和判定其空间方位的功能。

（3）触觉、力觉反馈　触觉提供手握物体时获得的丰富感觉信息，包括分辨表面材质及温度、湿度、厚度、张力等。用户的手是与虚拟环境进行自然交互时的重要途

径，当手与虚拟物体发生碰触时，我们自然希望有接触感和压力感。

虚拟现实系统的结构框图如图 2-22 所示。

**3. 虚拟环境数据库**

虚拟环境数据库的作用是存放整个虚拟环境中所有物体的各方面信息（包括物体及其属性，如约束、物理性质、行为、几何、材质等）。



图 2-21　头盔显示器

虚拟环境数据库由实时系统软件管理。虚拟环境数据库中的数据只加载用户可见部分，其余留在磁盘上，需要时导入内存。

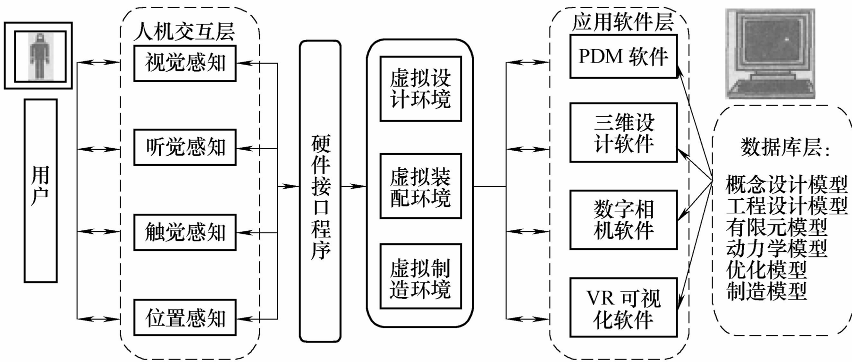



图 2-22　虚拟现实系统结构框图

## 2.3.3　虚拟现实系统的分类

虚拟现实系统按照不同的标准有不同的分类，通常分为桌面虚拟现实系统、沉浸式虚拟现实系统和分布式虚拟现实系统三种类型。

**1. 桌面虚拟现实系统**

桌面虚拟现实系统是一套基于普通 PC 平台的小型虚拟现实系统。利用中低端图形工作站及立体显示器，产生虚拟场景。参与者使用位置跟踪器、数据手套、力反馈器、三维鼠标或其他手控输入设备，实现虚拟现实技术的重要技术特征：多感知性、沉浸感、交互性、真实性。

在桌面虚拟现实系统中，计算机的屏幕是参与者观察虚拟境界的一个窗口。在一些专业软件的帮助下，参与者可以在仿真过程中设计各种环境。立体显示器用来观看虚拟三维场景的立体效果，它所带来的立体视觉能使参与者产生一定程度的投入感。交互设备用来驾驭虚拟境界。桌面虚拟现实系统虽然缺乏完全沉浸式效果，但是其应用仍然比较普遍，因为它的成本相对要低得多，而且它也具备了投入型虚拟现实系统的技术要求。

桌面虚拟现实系统主要包括 VR 软硬件两部分。其中硬件部分可分为 VR 立体图形

显示、效果观察、人机交互等几部分；软件部分可分为 VR 环境开发平台（Virtools）、建模平台（3D MAX 等）和行业应用程序实例。

**2. 沉浸式虚拟现实系统**

沉浸式虚拟现实系统利用头盔显示器把用户的视觉、听觉和其他感觉封闭起来，产生一种身在虚拟环境中的错觉。虚拟环境可以是任意虚构的、实际不存在的世界，任何操作不对外界产生直接作用，一般用于娱乐或验证某一猜想假设、训练、模拟、预演、检验、体验等。采用专门为仿真和虚拟现实行业设计和生产的设备，拼接画面采用多通道优化技术，进行光学校正和电子融合，达到完美无缝拼接，采用弧形投影幕或多维投影方式，整体系统由中央控制器进行集中控制。

**3. 分布式虚拟现实系统**

分布式虚拟现实系统是一个基于网络的可供异地多用户同时参与的分布式虚拟环境。在这个环境中，位于不同物理环境位置的多个用户或多个虚拟环境通过网络相连接，或者多个用户同时参加一个虚拟现实环境，通过计算机与其他用户进行交互，并共享信息。在分布式虚拟现实系统中，多个用户可通过网络对同一虚拟世界进行观察和操作，以达到协同工作的目的。

分布式虚拟现实系统的特征：①共享的虚拟工作空间；②伪实体的行为真实感；③支持实时交互，共享时钟；④多个用户以多种方式相互通信；⑤资源信息共享，允许用户自然操作环境中的对象。

分布式虚拟现实系统有 4 个基本组成部件：图形显示器、通信和控制设备、处理系统和数据网络。

分布式虚拟现实系统在远程教育、工程技术、建筑、电子商务、交互式娱乐、远程医疗、大规模军事训练等领域都有着极其广泛的应用前景。利用它可以创建多媒体通信、设计协作系统、实境式电子商务、网络游戏、虚拟社区全新的应用系统。

## 2.3.4　虚拟现实的关键技术

三虚拟现实是多种技术的综合，其关键技术包括以下几个方面。

**1. 动态环境建模技术**

虚拟环境的建立是虚拟现实技术的核心内容。动态环境建模技术的目的是获取实际环境的三维数据，并根据应用的需要，利用获取的三维数据建立相应的虚拟环境模型，以求有真实感。三维数据的获取可以采用 CAD 技术（有规则的环境），而更多的环境则需要采用非接触式的视觉建模技术，两者的有机结合可以有效地提高数据获取的效率。

**2. 实时三维图形系统和虚拟现实交互技术**

利用实时三维图形系统，可以生成有逼真感的图像，图像具有三维全彩色、明暗、纹理和阴影等特征。虚拟现实是一种交互式和先进的计算机显示技术，双向对话是它的一种重要工作方式，为虚拟环境提供了一种新的人机接口。

**3. 传感器技术**

虚拟现实的交互能力，如显示及拾取技术，均依赖于传感器技术的发展。而现有

的传感器的精度还远远不能满足系统的需要。例如，数据手套的专用传感器就存在工作频带窄、分辨率低、作用范围小、使用不便等缺陷。因而寻找和制作新型、高质量的传感器便成了该领域的首要问题。

**4. 开发和系统集成技术工具**

虚拟现实应用的关键是寻找合适的场合和对象，即如何发挥想象力和创造力。选择适当的应用对象可以大幅度地提高生产效率，减轻劳动强度，提高产品开发质量。为了达到这一目的，必须研究虚拟现实的开发工具。例如，虚拟现实系统开发平台、分布式虚拟现实技术等。由于虚拟现实中包括大量的感知信息和模型，因此系统的集成技术起着至关重要的作用。集成技术包括信息的同步技术、模型的标定技术、数据转换技术、数据管理模型、识别和合成技术等等。

## 2.3.5　虚拟现实技术的应用

**1. 工业领域**

（1）产品的外形设计　汽车外形造型设计是汽车设计的一个极为重要的方面。以前多采用泡沫塑料制作外形模型，要通过多次的评测和修改，费工费时。而采用虚拟现实建模的外形设计，可随时修改、评测，方案确定后的建模数据可直接用于冲压模具设计、仿真和加工，甚至用于广告和宣传。在其他产品（如飞机、建筑和装修、家用电器、化妆品包装等）外形设计中，均有极大的优势。

（2）产品的布局设计　在复杂产品的设计中，通过虚拟现实技术可以直观地进行设计，避免可能出现的干涉和其他不合理问题。例如，工厂和车间设计中的机器布置、管道铺设、物流系统等，都需要该技术的支持。在复杂的管道系统、液压集流块设计中，设计者可以“进入”其中进行管道布置，检查可能的干涉等错误。在汽车、飞机的内部设计中，“直观”是最有效的工具，虚拟现实技术可发挥不可替代的积极作用。

（3）机械产品的运动仿真　在产品设计阶段中必须解决运动构件在运动过程中的运动协调关系、运动范围设计、可能的运动干涉检查等。图 2-23 为虚拟仿真示意图。

（4）产品虚拟装配　虚拟装配是虚拟制造的重要组成部分，利用虚拟装配，可以验证装配设计和操作的正确与否，以便及早的发现装配中的问题，对模型进行修改，并通过可视化显示装配过程。虚拟装配系统允许设计人员考虑可行的装配序列，自动生成装配规划，它包括数值计算、装配工艺规划、工作面布局、装配操作的模拟等。



图 2-23　虚拟仿真示意图

在交互式虚拟装配环境中，用户使用各类交互设备（数据手套/ 位置跟踪器、鼠标/键盘、力反馈操作设备等），像在真实环境中一样对产品的零部件进行各类装配操作。在操作过程中系统提供实时的碰撞检测、装配约束处理、装配路径与序列处理等功能，从而使用户能够对产品的可装配性进行分析、对产品零部件装配序列进行验证和规划、对装配操作人员进行培训等。在装配（或拆卸）结束以后，系统能够记录装配过程的所有

信息，并生成评审报告、视频录像等供随后的分析使用。图 2-24 为产品虚拟装配示意图。

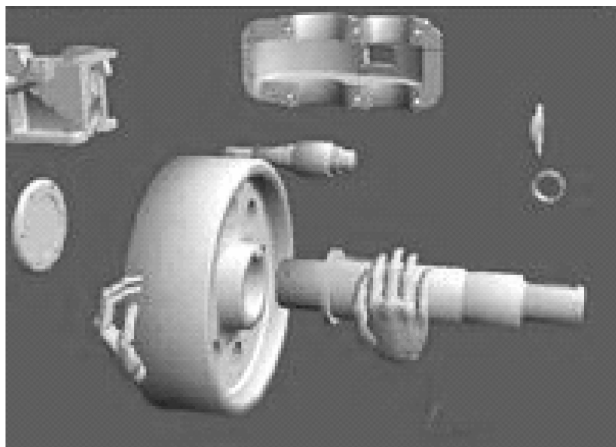


图 2-24　产品虚拟装配示意图

（5）产品加工过程仿真　产品加工是个复杂的过程。产品设计的合理性、可加工性、加工方法及机床的选用、加工过程中可能出现的加工缺陷等，有时在设计时是不容易发现和确定的，必须经过仿真和分析。例如，冲压件的形状或冲压模具设计不合理，可能造成冲压件的翘曲和破裂，造成废品。铸造件的形状或模具、浇口设计不合理，容易产生铸造缺陷，甚至报废。机加工件的结构设计不合理，可能产生无法加工，或者加工精度无法保证，或者必须采用特种加工，增加了加工成本和加工周期。通过仿真，可以预先发现问题，采取修改设计或其他措施，保证工期和产品质量。

（6）虚拟样机与产品工作性能评测　设计、重新制造等一系列的反复试制过程，许多不合理设计和错误设计只能等到制造、装配过程中，甚至到样机试验时才能发现。产品的质量和工作性能也只能当产品生产出来后，通过试运转才能判定。这时，多数问题是无法更改的，修改设计就意味着部分或全部的报废和重新试制。因此，常常要进行多次试制才能达到要求，试制周期长，费用高。而采用虚拟制造技术，可以在设计阶段就对设计的方案、结构等进行仿真，解决大多数问题，提高一次试制成功率。采用虚拟现实技术，可以方便、直观地进行工作性能检查。图 2-25 为产品工作性能测评示意图。



图 2-25　产品工作性能测评示意图

**2. 医疗领域**

虚拟现实技术可用于解剖教学，复杂手术过程的规划，在手术过程中提供操作和信息上的辅助，预测手术结果等。另外，在远程医疗中，虚拟现实技术也很有潜力。例如，在偏远山区，通过远程医疗虚拟现实系统，

患者不进城也能够接受名医的治疗。对于危急病人，还可以实施远程手术。医生对病人模型进行手术，他的动作通过卫星传送到远处的手术机器人。手术的实际图像通过机器人上的摄像机传回医生的头盔立体显示器，并将其和虚拟病人模型进行叠加，为医生提供有用的信息。美国斯坦福国际研究所已成功研制出远程手术医疗系统。

**3. 航天领域**

失重是航天飞行中必须克服的困难，因为在失重情况下对物体的运动难以预测。为了在太空中进行精确的操作，需要对宇航员进行长时间的失重仿真训练。为了逼真地模拟太空中的情景，美国航天局（NASA）在“哈勃太空望远镜的修复和维护”计划中采用了 VR 仿真训练技术。在训练中，宇航员坐在一个模拟的具有“载人操纵飞行器”功能并带有传感装置的椅子上。椅子上有用于在虚拟空间中作直线运动的位移控制器和用于围绕宇航员重心调节宇航员朝向的旋转控制器。宇航员头戴立体头盔显示器，用于显示望远镜、航天飞机和太空的模型，并用数据手套作为和系统进行交互的手段。训练时宇航员在望远镜周围就可以进行操作，并且通过虚拟手接触操纵杆来抓住需要更换的“模块更换仪”。抓住模块更换仪后，宇航员就可以利用座椅的控制器在太空中飞行。

**4. 对象可视化领域**

VR 技术应用的例子是模拟风洞。模拟风洞可以让用户看到模拟的空气流场，使他感到就像真的站在风洞里一样。虚拟风洞的目的是让工程师分析多旋涡的复杂三维性和效果、空气循环区域、旋涡被破坏的乱流等。例如，可以将一个航天飞机的 CAD 模型数据调入模拟风洞进行性能分析。为了分析气流的模式，可以在空气流中注入轨迹追踪物，该追踪物将随气流飘移，并把运动轨迹显示给用户。追踪物可以通过数据手套投降到任意指定的位置，用户可以从任意视角观察其运动轨迹。

**5. 军事领域**

VR 技术应用的另一个例子是“联网军事训练系统”。在该系统中，军队被布置在与实际车辆和指挥中心相同的位置，他们可以看到一个有山、树、云彩、硝烟、道路、建筑物及由其他部队操纵的车辆的模拟战场。这些由实际人员操作的车辆可以相互射击，系统利用无线电通信和声音来加强真实感。系统的每个用户可以通过环境视点来观察别人的行动。炮火的显示极为真实，用户可以看到被攻击部队炸毁的情况。从直升机上看到的场景也非常逼真。这个模拟系统可用来训练坦克、直升机和进行军事演习，以及训练部队之间的协同作战能力。还可以用于飞行员模拟训练、单兵作战演练和反恐警察模拟作战，可大幅节省预算和风险。图 2-26 为虚拟军事训练示意图。

**6. 城市规划**

系统用于展示城市规划、宣传城市建设、提升城市形象。系统根据城市的当前状况和对城市的未来规划，将城市的过去、现在和将来任意时间的情况展示在规划设计者、政府决策者、投资开发者和普通市民面前。该系统首先根据城市的当前状况和对城市的规划资料完成城市的设计，然后该系统的交互控制软件可以帮助使用者从不同角度遍历城市的各个部分，帮助有关人员作决策。图 2-27 为基于虚拟现实技术的城市规划示意图。

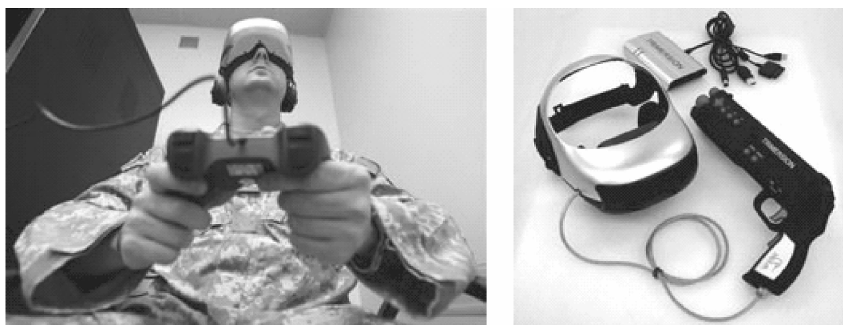


图 2-26　虚拟军事训练示意图



图 2-27　虚拟城市规划示意图

**7. 大型工程漫游**

展示各种拟建设的工程项目，为国际和国内工程设计投标建立多种层次、细节丰富的虚拟模型，真实呈现工程竣工后的情况。用户可选择不同路径进入该项工程的任意部分，也可为已建设或正在建设的各种工程项目展示其周边环境、内部装修、固定设施的配套情况。图 2-28 为某生产线的漫游示意图。



图 2-28　生产线漫游示意图

**8. 虚拟旅游**

展现名胜古迹的景点，可以任意选择路径遨游各景点，乐趣无穷。图 2-29 为虚拟旅游示意图。



图 2-29　虚拟旅游示意图

# 第 3 章　在制造方面的应用

## 3.1　激光切割技术

### 3.1.1　概述

激光切割（Laser Beam Cutting）是激光加工行业中最重要的一项应用技术，它占整个激光加工业任务的 70% 以上。激光切割与其他切割方法相比，最大区别是它具有高速、高精度和高适应性的特点，同时还具有割缝细、热影响区小、切割面质量好、切割时无噪声、切割过程容易实现自动化控制等优点。激光切割板材时，不需要模具，可以替代一些需要采用复杂大型模具的冲切加工方法，能大大缩短生产周期和降低成本。因此，目前激光切割已广泛地应用于汽车、机车车辆制造、航空、化工、轻工、电器与电子、石油和冶金等工业部门。

随着我国国民经济的快速发展，我国数控激光切割成套设备市场需求年增长速度达到 50% 以上，数控激光切割技术以其柔韧性和灵活性在薄板加工领域逐步取代了传统加工手段。图 3-1 为激光切割。



图 3-1　激光切割

在高功率数控激光切割成套设备开发及制造方面，经过十几年的发展，我国激光切割技术及装备从无到有，已逐步形成一定产业规模。2007 年国内大型激光切割设备的销售额达到 15 亿元人民币，在中低端产品方面基本占领国内市场，并有部分产品出口。但与美国、欧盟、日本等发达国家相比，我国的激光切割设备仍然停留在低端产品阶段，而且高功率激光器、激光专用控制系统、激光光束传输控制、激光切割专有技术等绝大部分核心技术还依赖进口。目前，国际上德国通快公司（TRUMPF）、瑞士百超（BYSTRONIC）和意大利 PRIMA 等国际知名公司已经开发出大功率、大幅面、高速、飞行光路、多维立体、数控自动的激光切割机。在高端激光切割系统领域，我国与国际先进水平存在较大差距。

### 3.1.2　激光切割原理

激光切割是用聚焦镜将激光束聚焦在材料表面，使材料熔化，同时用与激光束同

轴的压缩气体吹走被熔化的材料，并使激光束与材料沿一定轨迹作相对运动，从而形成一定形状的切缝。它充分利用激光和计算机技术来实现“速度快、精度高、省料”，不会造成机械变形，从而提高产品档次。激光加工无需模具，更有利于新产品的开发。

激光切割属于热切割方法之一。激光切割的原理如图 3-2 所示。

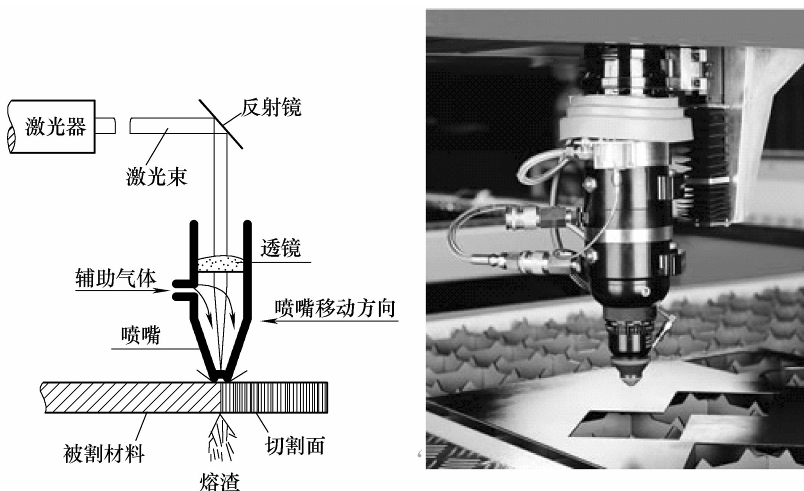



图 3-2　激光切割原理

### 3.1.3　激光切割的分类

激光切割可分为激光汽化切割、激光熔化切割、激光氧气切割和激光划片与控制断裂切割四种。

**1. 激光汽化切割**

当高功率密度的激光照射到材料表面时，材料在极短时间内被加热到汽化点，并以气体或者为气体冲击以液态、固态微粒形式逸出，形成割缝。由于材料的汽化热很大，所以激光汽化切割多用于切割极薄金属材料和非金属材料（如纸、布料、木材、塑料和橡胶等）。它需要 $10^8 W/cm^2$ 的高功率密度，是熔化切割机所需能量的 10 倍。

**2. 激光熔化切割**

激光熔化切割时，用激光加热使金属材料熔化，然后通过与光束同轴的喷嘴喷吹非氧化性气体（Ar、He、N 等），依靠气体的强大压力使液态金属排出，形成切口。激光熔化切割不需要使金属完全汽化，所需能量只有汽化切割的 1/10。激光熔化切割主要用于一些不易氧化的材料或活性金属的切割，如不锈钢、钛、铝及其合金等。

**3. 激光氧气切割**

激光氧气切割原理类似于氧乙炔切割。激光氧气切割是用激光作为预热热源，用氧气等活性气体作为切割气体。喷吹出的气体一方面与切割金属作用，发生氧化反应，放出大量的氧化热；另一方面把熔融的氧化物和熔化物从反应区吹出，在金属中形成切口。由于切割过程中的氧化反应产生了大量的热，所以激光氧气切割所需要的能量

只是熔化切割的 1/2，而切割速度远远大于激光汽化切割和熔化切割。激光氧气切割主要用于碳钢、钛钢及热处理钢等易氧化的金属材料的切割。

**4. 激光划片与控制断裂切割**

激光划片切割是利用高能量密度的激光在脆性材料的表面进行扫描，使材料受热蒸发出一条小槽，然后施加一定的压力，脆性材料就会沿小槽处裂开。激光划片用的激光器一般为 Q 开关激光器和 $CO_2$ 激光器。控制断裂切割是利用激光刻槽时所产生的陡峭的温度分布，在脆性材料中产生局部热应力，使材料沿小槽断开。在这种切割中，主要应控制激光功率和光斑大小。

## 3.1.4 激光切割机器人

激光切割机器人有 $CO_2$ 气体激光切割机器人和 YAG 固体激光切割机器人。通常激光切割机器人既可进行切割又能用于焊接。

**1. $CO_2$ 激光切割机器人**

L—1000 型 $CO_2$ 激光切割机器人结构简图如图 3-3 所示。

L—1000 型 $CO_2$ 激光切割机器人是极坐标式 5 轴控制机器人，配用 C1000 ~ C3000 型激光器。光束经由设置在机器人手臂内的 4 个反射镜传送，聚焦后从喷嘴射出。反射镜用铜制造，表面经过反射处理，使光束传递损失不超过 0.8%，而且焦点的位置精度相当好。为了防止反射镜受到污损，光路完全不与外界接触，同时还在光路内充入经过滤器过滤的洁净空气，并具有一定的压力，从而防止周围的灰尘进入。L—1000 型 $CO_2$ 激光切割机器人的主要技术参数见表 3-1。

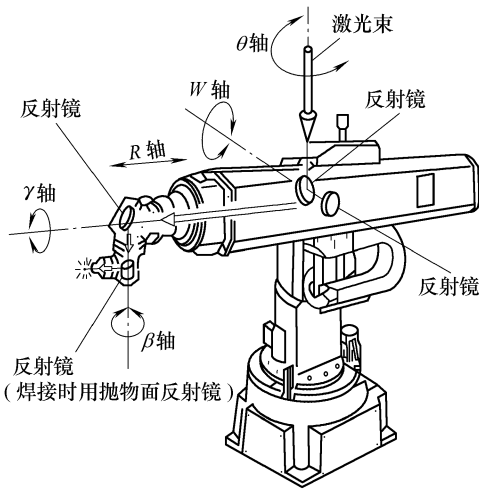



图 3-3　L—1000 型 $CO_2$ 激光切割机器人结构简图

**2. 多关节 YAG 固体激光切割机器人**

日本研制的多关节型 YAG 激光切割机器人的结构如图 3-4 所示。

**表 3-1　L—1000 型 $CO_2$ 激光切割机器人的主要技术参数**

| 项　　目 | | 技术参数 |
|---|---|---|
| 动作形态 | | 极坐标式 |
| 控制轴数 | | 5 轴（$\theta$、$w$、$R$、$\gamma$、$\beta$） |
| 设置状态 | | 固定在地面或悬挂在门架上 |
| 工作范围 | $\theta$ 轴/（°） | 200 |
| | $w$ 轴/（°） | 60 |
| | $R$ 轴/mm | 1200 |

（续）

| 项　　目 | | 技 术 参 数 |
|---|---|---|
| 工作范围 | $\gamma$ 轴/（°） | 360 |
| | $\beta$ 轴/（°） | 280 |
| 最大动作速度 | $\theta$ 轴/（°/s） | 90 |
| | $w$ 轴/（°/s） | 70 |
| | $R$ 轴/（mm/s） | 90 |
| | $\gamma$ 轴/（°/s） | 360 |
| | $\beta$ 轴/（°/s） | 360 |
| 手臂前段可携带质量/kg | | 5 |
| 驱动方式 | | 交流伺服电动机伺服驱动 |
| 控制方式 | | 数字伺服控制 |
| 位置重复精度/mm | | ±0.5 |
| 激光反射镜数量 | | 4 |
| 激光进入口直径/mm | | 62 |
| 辅助气体管路系统 | | 2 套 |
| 光路清洁用空气管路系统 | | 1 套 |
| 激光反射镜冷却水系统 | | 进、出水各 1 套 |
| 机械结构部分的质量/kg | | 580 |

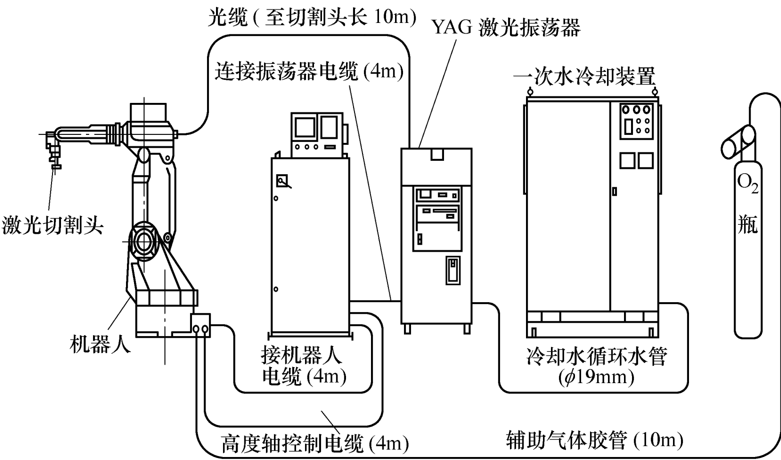



图 3-4　多关节型 YAG 激光切割机器人的结构

多关节型 YAG 激光切割机器人是用光纤维把激光器发出的光束直接传送到装在机器人手臂的割炬中，因此比 $CO_2$ 气体激光切割机器人更为灵活。这种机器人是由原来的焊接机器人改造而成的，采用示教方式，适用于三维板金属零件，如轿车车体模压件等的毛边修割、打孔和切割加工。

## 3.1.5　激光切割特点

激光切割与其他热切割方法相比较，总的特点是切割速度快、质量高，其具体特

征可概括为如下几个方面。

1）精度高。切割零件的尺寸精度可达±0.05mm。定位精度0.05mm，重复定位精度0.02mm。

2）切缝窄。激光束聚焦成很小的光点，使焦点处达到很高的功率密度，材料很快加热至汽化程度，蒸发形成孔洞。随着光束与材料相对线性移动，使孔洞连续形成宽度很窄的切缝。切口宽度一般为0.10~0.20mm。

3）切割面光滑。切割面无毛刺，切口表面粗糙度 $R_a$ 一般控制在12.5以内。

4）切割速度快。切割速度可达10m/min，最大定位速度可达70m/min。用功率为1200W的激光切割2mm厚的低碳钢板，切割速度可达600cm/min；切割5mm厚的聚丙烯树脂板，切割速度可达1200cm/min。材料在激光切割时不需要装夹固定，既可节省装夹工具，又节省了上下料的辅助时间。

5）切割质量好。为无接触切割，激光切割头不会与材料表面相接触，不损伤工件。切边受热影响很小，基本没有工件热变形，完全避免材料冲剪时形成的塌边，切缝一般不需要二次加工。

6）切割材料种类多。与氧乙炔切割和等离子切割相比，激光切割材料的种类多，包括金属、非金属、金属基和非金属材料（如塑料、PVC、皮革、木材、纺织品、有机玻璃等）。不管什么样的硬度，都可以进行无变形切割。

7）不受工件形状的影响。激光加工柔性好，可以加工任意图形，可以切割管材及其他异形材。还可以把不同形状的产品进行整张板材料套裁，最大限度地提高材料的利用率。

8）节约模具投资。激光加工不需模具，没有模具消耗，无须修理模具，节约更换模具时间，从而节省了加工费用，降低了生产成本，尤其适合大件产品的加工。

9）提高新产品开发速度。产品图样形成后，马上可以进行激光加工，在最短的时间内得到新产品的实物。

10）设备费用高。激光切割设备费用高，一次性投资大。同时，由于受激光器功率和设备体积的限制，激光切割只能切割中、小厚度的板材和管材，而且随着工件厚度的增加，切割速度明显下降。

### 3.1.6 激光切割的应用

激光切割是激光加工行业中最量要的一项应用技术，由于具有诸多特点，已广泛地应用于汽车、机车车辆制造、航空航天、化工、轻工、电器与电子、环保设备、家用电器制造、石油和冶金等工业部门。大多数激光切割机都由数控程序进行控制操作或做成切割机器人。激光切割作为一种精密的加工方法，几乎可以切割所有的材料，包括薄金属板的二维切割或三维切割。

**1. 金属材料的激光切割**

虽然几乎所有的金属材料在室温对红外波能量有很高的反射率，但发射处于远红外波段10.6μm光束的 $CO_2$ 激光器还是可成功应用于许多金属的激光切割。金属对10.6μm激光束的起始吸收率只有0.5%~10%，但是，当具有功率密度超过 $10^6W/cm^2$

的聚焦激光束照射到金属表面时，却能在微秒级的时间内很快使表面开始熔化。处于熔融态的大多数金属的吸收率急剧上升，一般可提高 60% ~80%。图 3-5 为金属材料的激光切削。

在汽车制造领域，小汽车顶窗等空间曲线的切割技术都已经获得广泛应用。德国大众汽车公司用功率为 500W 的激光器切割形状复杂的车身薄板及各种曲面件。在航空航天领域，激光切割技术主要用于特种航空材料的切割，如钛合金、铝合金、镍合金、铬合金、不锈钢、氧化铍、复合材料、塑料、陶瓷及石英等。用激光切割加工的航空航天零部件有发动机火焰筒、钛合金薄壁机匣、飞机框架、钛合金蒙皮、机翼长桁、尾翼壁板、直升机主旋翼、航天飞机陶瓷隔热瓦等。



图 3-5　金属材料的激光切削

法利莱公司独创的汽车变档套全自动激光切割设备如图 3-6 所示。该设备定位准确，精度高，切割质量更好，端面光滑，切割效率比传统方式高一倍。

**2. 非金属材料的激光切割**

激光切割成形技术在非金属材料领域也有着较为广泛的应用。不仅可以切割硬度高、脆性大的材料，如氮化硅、陶瓷、石英等，还能切割加工柔性材料，如布料、纸张、塑料板、橡胶等。如用激光进行服装剪裁，可节约布料 10% ~12%，提高功效 3 倍以上。10.6μm 波长的 $CO_2$ 激光束很容易被非金属材料吸收，导热性不好且蒸发温度低又使吸收的光束几乎整个输入材料内部，并在光斑照射处瞬间汽化，形成起始孔洞，进入切割过程的良性循环。图 3-7 为激光切削的非金属材料样品。



图 3-6　汽车变档套全自动激光切割设备

## 3.1.7　激光切割技术发展趋势

**1. 高速、高精度激光切割机**

由于大功率激光器光束模式的改善及 32 位微机的应用，为激光切割设备的高速、高精度创造了有利条件。目前国际先进水平的激光切割机的切割速度已超过 20m/min，两轴快速运动可达 25m/min，加速度最大为 10$g$，定位精度达 0.01mm/500mm。采用高速、高精度的激光切割机，在切割板厚 1mm，直径 10mm 的小孔时，每分钟能切割 500

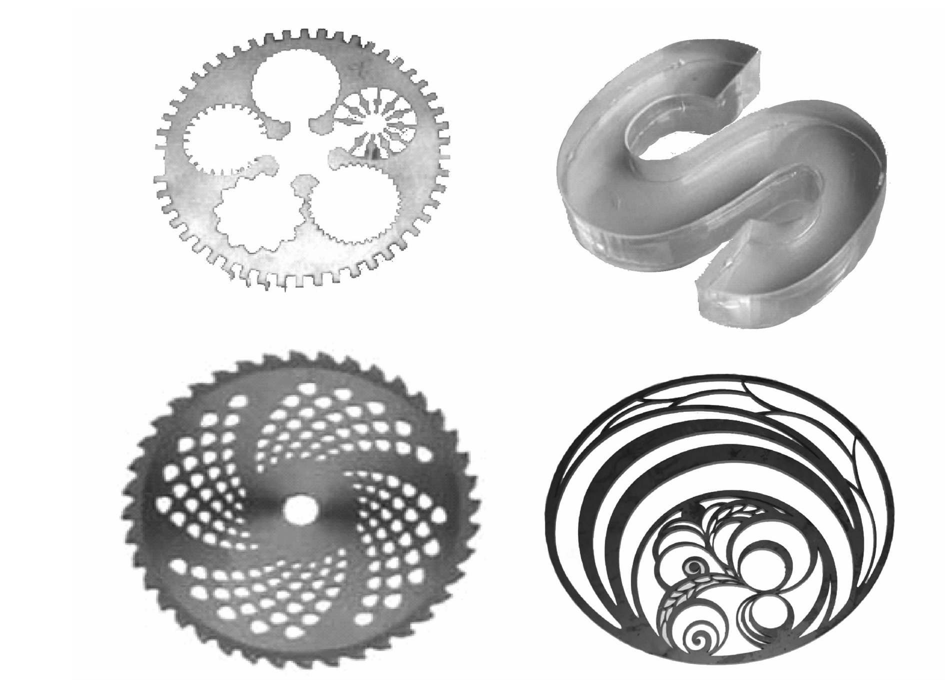


图 3-7　激光切削的非金属材料样品

多个，而其直径误差不超过 50μm，实现了真正意义上的飞行切割技术。

**2. 厚板切割和大尺寸工件切割的大型激光切割机**

随着可用于激光切割的激光器功率的增大，激光切割正从轻工业薄板的钣金加工向着重工业厚板切割方向发展。60kW 大功率激光器，能切割低碳钢板最大厚度达 32mm 的大尺寸工件。由于厚板激光切割技术的不断改进，目前已经尝试使用 3kW 的激光器切割通常需要用 62kW 激光器才能切割的 32mm 厚的低碳钢板，并已用于试生产。此外，激光切割机的加工尺寸范围也在不断扩大，目前生产最大激光切割机的机宽可达 504m，长达 6m。这都说明了厚板、大尺寸激光切割技术正在逐渐提高。

**3. 三维立体多轴数控激光切割机**

为了满足汽车、航空等工业的立体工件切割的需要，目前已发展了各种各样的 5 轴或 6 轴三维激光切割机，其最大加工工件尺寸可达 3600mm × 3600mm × 600mm，数控轴数达到 9 轴，加工速度快，精度高。在 $6m^2$ 范围内加工误差仅在 0.1mm 之内，在先进国家的汽车生产线上，YAG 激光切割机器人的应用愈来愈多。目前，三维激光切割机正向高效率、高精度、多功能和高适应性方向发展，其应用范围将会愈来愈大。

**4. 激光切割单元自动化和无人化**

为了提高生产率和节省劳动力，目前激光切割正向着激光切割单元无人化和自动化方向发展。发展这种单元自动化系统，必须依赖于先进的自动控制、网络控制技术及计算机生产辅助管理系统技术等。国外已有各种各样的激光切割单元可提供市场，并有由 6 台大型激光切割机为核心组成的无人化的切割生产线在工厂运行。

#### 5. 紧凑型和组合一体化数控激光切割机

随着激光器体积的缩小和功率的增大，以及辅助装置的不断完善，出现了把激光器、电源、主机、控制系统和冷却水循环装置等紧密地组合在一起，形成占地面积小、功能完善的整套紧凑型激光切割机。此外，激光切割技术正与激光焊接、激光表面淬火等激光加工工艺组合，以发展一机多用，进一步提高设备的利用率。

## 3.2　激光热处理技术

1960 年第一台固体激光器——红宝石激光器及 1961 年第一台气体激光器——氦氖激光器的先后研制成功为激光诞生的标志。经过几十年的发展，激光技术已成为在工业技术中应用广泛的技术之一，激光热处理（Laser Heat Treatment）便是激光技术最重要的应用领域之一。

### 3.2.1　激光热处理原理

激光的穿透能力极强，当把金属表面加热到仅低于熔点的临界转变温度时，其表面迅速奥氏体化，然后急速自冷淬火，金属表面迅速被强化。激光热处理就是利用高功率密度的激光束对金属进行表面处理的方法，对材料实现相变硬化、表面合金化等表面改性处理，产生用其他表面淬火达不到的表面成分、组织、性能的改变。激光表面改性方法与功率密度及作用时间的关系如图 3-8 所示。

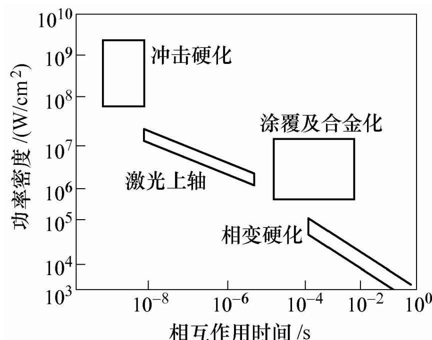



图 3-8　激光表面改性方法与功率密度及作用时间的关系

激光热处理包括激光淬火、激光表面合金化、激光涂覆、激光重熔、激光非晶化和激光化学气相沉积（LCVD）等内容。激光热处理特别适合于各种金属表层改性，是激光技术在工业应用上的重要内容之一。

### 3.2.2　激光热处理技术的特点

激光具有单色性、相干性、方向性和高能量密度四大特点，因此，其穿透能力极强。激光的穿透能力是由其能量大小、功率密度强弱、时间长短而决定的。当功率密度为 $10^3 \sim 10^7 W/cm^2$ 时，以 $10^3 \sim 10^7$℃/s 的加热速度把金属表面加热到仅低于熔点的临界转变温度，其表面迅速奥氏体化，然后急速自冷淬火，冷却速度可达 $1.7 \times 10^4$℃/s，金属表面迅速被强化，这就是激光相变硬化。经激光处理后，铸铁表面硬度可以达到 60HRC 以上；中碳及高碳的碳钢，表面硬度可达 70HRC 以上，从而提高其抗磨性、抗疲劳、耐腐蚀、抗氧化等性能，延长其使用寿命。激光热处理技术与其他热处理如高频淬火、渗碳、渗氮等传统工艺相比，具有以下特点：

1）无需使用外加材料，仅改变被处理材料表面的组织结构。处理后的改性层具有

足够的厚度，可根据需要调整深浅，一般可达 0.1 ~ 0.8mm。

2）具有高速加热、高速冷却的特点，获得的组织细密、硬度高、耐磨性能好。

3）淬火部位可获得大于 4000N/mm$^2$ 的残余压应力，有助于提高抗疲劳性能。

4）被处理件变形极小。由于激光功率密度高，与零件的作用时间很短，故零件的热变形区和整体变化都很小。故适合于高精度零件处理，作为材料和零件的最后处理工序。

5）还可以进行局部选择性淬火。通过对光斑尺寸的控制，更适合其他热处理方法无法胜任的管孔、深沟、微区、夹角和刀具刃口等局部区域的硬化。

6）激光可以远距离传送，可以实现一台激光器多工作台同时或单独使用，采用计算机编程实现对激光热处理工艺过程的控制和管理，实现生产过程的自动化。

7）因是自冷淬火而不需淬火冷却介质。

## 3.2.3　激光热处理设备

激光热处理设备主要包括激光器、导光系统、工作台、控制系统及安全防护装置等。导光系统的作用是将激光器发出的激光束经光学元件引向工作台。工作台的作用是完成各项操作以满足热处理加工的要求，亦称为激光加工机床，其发展在激光热处理技术发展中起着十分重要的作用，根据用途的不同分为专用机床和通用机床两种。

图 3-9 为我国自行研制的 HGL—5000 型 $CO_2$ 激光多功能热处理成套设备，采用了光机电一体化的总体设计，质量可靠，外型美观。激光器采用华工激光的具有国际水平的连续横流 $CO_2$ 激光器，数控系统采用五轴四联动或六轴五联动系统，机床采用拥有自主知识产权的悬臂式结构，特殊设计的高精度飞行光路系统及光头摆动机构，可实现柔性加工。其性能稳定，人机界面清晰，操作简单易学，能进行激光相变淬火、激光熔凝淬火、激光合金化、激光熔覆/再制造等加工，具有如下特点。

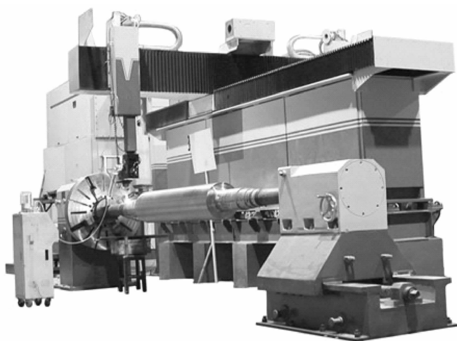


图 3-9　HGL—5000 型 $CO_2$ 激光多功能热处理设备

1）激光器光束特性好，发散角≤3mrad；能无 He 工作，降低运行成本。

2）可选配扩束准直仪，在 15m 处光斑直径仅为 $\phi$50mm。

3）机床为模块式组装，采用轻巧便捷的飞行光路，通过五轴四联动或六轴五联动的形式，对工件进行灵活高效的加工，$X$、$Y$、$Z$ 最大行程可达 5m × 2.5m × 0.7m，设有柔性积分聚焦头，进行大幅面和曲面加工，满足各类零件（如轴类、盘类、平面类、齿槽类等零件）的激光加工，回转件的最大尺寸可达 3000mm。

4）工作稳定可靠，人机界面清晰，操作简单易学。

该设备可广泛应用于模具、机械制造、石油、化工、轻工、能源、交通、军工等行业。典型应用有汽车覆盖件模具、油管螺纹及接箍、瓦楞辊、导轨、齿轮、锯片、

缸套、冷热轧辊、曲轴、汽轮发电机转子轴、螺杆、阀门等易损零件的表面强化处理或再制造。其机床参数见表 3-2。

表 3-2　$CO_2$ 激光多功能热处理设备机床技术参数

| 序号 | 品目 | HGL—5000 | HGL—6000 | HGL—8000 | HGL—10000 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 额定输出功率 | 5000W | 6000W | 8000W | 10000W |
| 2 | 功率调节范围 | 200～5000W | 200～6000W | 200～8000W | 200～10000W |
| 3 | 激光输出模式 | 多模 | 多模 | 多模 | 多模 |
| 4 | 功率不稳定度 | ≤±3% | ≤±3% | ≤±3% | ≤±3% |
| 5 | 激光专用冷却系统制冷量 | 6 万大卡 | 7 万大卡 | 10 万大卡 | 12 万大卡 |
| 6 | 激光专用冷却系统/冷却方式 | 水冷/风冷 | 水冷 | 水冷 | 水冷 |
| 7 | 光路转折系统 | 多重转折，有效保证光路和光束质量的稳定性 | | | |
| 8 | 多功能加工机床 | 根据用户需要定制，采用四轴或五轴（或五轴以上）多轴联动设计，可操控性强，性能稳定，通过各动作机构联动，可以对平面、圆辊、凹槽、曲轴弯角、内孔等复杂形态进行激光加工 | | | |
| 9 | 数控系统 | Siemens 系统 | Siemens 系统 | Siemens 系统 | Siemens 系统 |

图 3-10 为 HANSGS—RW 瓦楞辊激光热处理熔覆成套设备。

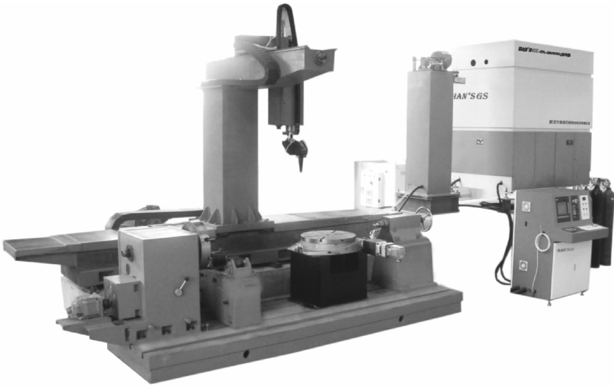


图 3-10　HANSGS—RW 瓦楞辊激光热处理熔覆成套设备

HANSGS—RW 瓦楞辊激光热处理熔覆成套设备由 6kW 的 $CO_2$ 激光器一台、专用配套冷水机组一套、激光加工机床一台构成。该设备运用激光表面硬化技术，可以使得瓦楞辊寿命提高一倍，具有优异激光修复功能，强力解决瓦楞辊掉齿等损伤，将旧辊变废为新；热处理效率可以达到 $100cm^2/min$，热处理深度为 0.5～0.8mm；处理后辊面硬度可以达到 60HRC 左右，费用低廉，仅为 100 元/小时。如果进行激光熔覆加工，其效率可达 4min/齿，熔覆高度 0.5mm，辊面硬度为 65HRC 左右，费用为 140 元/小时。可运用于瓦楞辊辊面硬化和修复成形等表面处理。图 3-11 为激光对瓦楞辊进



图 3-11　激光对瓦楞辊表面热处理

行表面热处理。

## 3.2.4 激光热处理技术的应用

### 1. 激光淬火

激光淬火即激光相变硬化，其基本原理是：在高能密度（$10^{3\sim5}$ W/cm$^3$）激光短时间照射下（$10^{-2}\sim1$s），金属表层被急速加热到相变温度以上形成奥氏体，当激光停止作用时，由于加热层与冷基体之间很陡的温度梯度能保证奥氏体快速冷却而转变成马氏体，从而实现了淬火硬化。故此，激光淬火是工件的自冷淬火。同时由于激光束作用区域很小，加热速度快，因此热影响区小，工件变形小，经激光处理后的工件无需进行再加工和校直。一些常用材料在激光表面硬化处理后的组织与性能如表 3-3 所示。

**表 3-3 激光相变硬化后的材料组织与性能**

| 材料 | 牌号 | 硬化层组织 | 硬度/HRC | 深度/mm |
|---|---|---|---|---|
| 铸铁 | | 马氏体基体 + 片状石墨 | 60 | 0.5 |
| 低碳钢 | SAE1018<br>(0.15 ~ 0.20% C) | 低碳马氏体 + 少量铁素体 | | 0.25 |
| 低合金钢 | SAE4340<br>8620<br>S2100 | 很细的马氏体 | 57 ~ 59<br>60<br>60 ~ 64 | 0.40<br>0.36<br>0.18 |
| 工具钢 | A6，D1 | | | 0.3 |
| 可锻铸铁 | | 团絮状石墨 + 周围马氏体 | | 0.25 ~ 0.35 |
| 高速钢 | | | 72 | 0.4 ~ 0.5 |

激光淬火的显著优点是硬化效果好，比常规淬火的硬度高出 20% 以上。GCr15、T10 和高速钢等均易得到 1000HV（70HRC）以上的硬度。高速钢激光淬火后热硬度可以提高 80HRC（回火温度 700℃，800HV，63HRC）。美国福特公司于 1975 年将激光淬火技术应用于发动机汽缸，使汽缸壁的硬度提高到 58 ~ 62HRC，大大提高了其耐磨性及寿命。国内自 20 世纪 80 年代中期也将该技术成功地应用到内燃机车发动机汽缸套及汽车修理行业汽缸上。图 3-12 为轧辊淬火加工图。



图 3-12 轧辊淬火

近年来，国内已开始探讨利用激光处理硬质合金，研究表明激光淬火能改善硬质合金的组织结构，从而提高硬质合金抗弯强度与显微硬度。

### 2. 激光合金化

激光合金化是在高能密度的激光照射下，使预定成分的合金材料（粉、丝、带板

等）与基材表层熔合凝固，形成具有优异性能的合金化层的激光热处理技术。该技术可使零件表层获得一定厚度的、具有所需性能的合金层。该技术的特点是利用具有各种性能的合金材料，在廉价的金属基体上快速生成高合金表层，从而达到金属材料表面改性的目的。目前，这项技术应用于工业生产，如汽车工业中阀座及拨叉等易磨损件上，已经获得了巨大的经济效益。该技术在低碳钢及非铁合金表面强化方面具有很好的应用前景。

**3. 激光表面涂覆**

激光表面涂覆与合金化处理的共性是快速熔凝，但前者有其自身的一些特点。激光表面涂覆在工件表面不会形成合金化层，而仅是保持原涂层成分的重熔覆盖层，仅在重熔区与基体的交界处存在很有限的相互扩散区，而此扩散区正是实现涂覆层与基体的冶金结合所必须的。

如图 3-13 所示的激光表面涂覆能把高熔点金属涂覆在低熔点工件上，从而获得优异特性的表面涂层（如耐热、耐蚀、耐磨、抗冲击等优良涂层）。这种技术应用极广，如燃气轮机、仪器仪表零件和工模具等。此外，激光涂覆还可用于各种零件的微量修补。

**4. 激光重熔**

激光重熔是在高能密度的激光照射下，使金属材料表面快速熔化，随后自行快冷，从而在基体组织上获得重熔层及淬火层双层硬化组织。研究表明，该项技术特别适用于改善铸铁的性能，利用 $CO_2$ 激光器对正反循环两用射流泵铸铁叶轮进行激光重熔处理，使用寿命可提高 3 倍以上。



图 3-13　激光表面涂覆

**5. 激光非晶化**

激光非晶化是利用极高功率密度的激光短时间照射材料，使表面快速熔化，在热量还来不及传递到基体金属即在液固两态之间产生极大的温度梯度，使溶化层的冷却速度超过形成非晶态的临界冷却速度而获得非晶态组织。工件表面一旦实现非晶化后，其强度、硬度将得到极大的提高，而且具有良好的耐腐蚀性。国外已采用激光非晶化技术研制太阳电池，并用于太空的电动机轴上。特别在那些要求工件耐腐蚀、硬度高且芯部韧性又好的地方，不锈钢难以胜任，而利用激光使工件实现表面非晶化即得以圆满解决。

**6. 激光化学气相沉积**（LCVD）

LCVD 技术即以激光诱导物质发生化学反应从而获得沉积膜的技术。它是近十多年来从传统 CVD 基础上发展起来的一项新技术，具有高分辨率、高沉积率等许多突出优点，因而引起了激光应用研究者的高度重视。

此外，近年来在材料表面处理工程领域中出现了用激光作为热源，对工件表面渗进各种化学元素的表面处理方法，如激光渗硼等。

## 3.3　激光打孔技术

激光打孔（Laser Drilling）是把激光束聚焦到工件表面上，利用高能量密度的激光束在工件的指定位置打出一个具有一定直径和深度的孔。激光束在经过透镜聚焦后可获得极高的功率密度，因此可在各种不同的材料上打孔，如各种金属、非金属、合金、宝石等。激光打孔是激光加工中应用很早的一个领域。早在20世纪60年代就有人采用红宝石激光器在钻石上打孔。近年来，激光打孔的发展度很快，尤其是在激光微孔加工及高重复率打孔方面具有独特的优势。

### 3.3.1　激光打孔机的组成

激光打孔机的结构原理图如图3-14所示，主要包括激光器、光束变换系统、导光系统、聚焦透镜、观察与定位系统和 $x$、$y$ 工作台等部分。

常用的激光器有各种固体激光器和气体激光器，如红宝石激光器、钕玻璃激光器、Nd-YAG激光器和 $CO_2$ 激光器等。它们大多工作于脉冲状态。红宝石激光器的输出波长是0.6943μm，是一种可见的红光，便于调整和观察，多用于早期的激光打孔机中，近年来已被钕玻璃激光器和Nd-YAG激光器所取代。根据各种材料对不同波长的激光吸收情况，钕玻璃激光器和Nd-YAG激光器多用于金属材料的打孔，$CO_2$ 激光器多用于非金属材料的打孔，也用于金属材料的打孔。

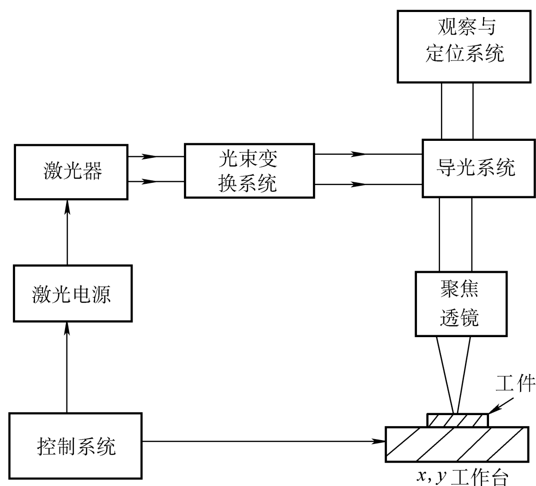


图3-14　激光打孔机的结构原理图

观察和定位系统用于对被加工工件的观察和定位，它通过一组光学变换系统将工件成像到光电探测器（如CCD，摄像机等）上，通过观察与摄像机相连的监视器的图像，实时监测打孔过程并对工件进行精确定位。$x$，$y$ 工作台由计算机控制，用于精确移动工件的位置。

### 3.3.2　激光打孔的原理及方法

激光打孔是利用激光辐射的高功率密度（$10^6 \sim 10^8 W/cm^2$）及高空间相干性，为了使被加工的金属材料能达到汽化温度，对大多数脉冲激光器来讲，均匀激光照射到半无限平板表面产生的温度 $T_0$ 为

$$T_0 = \frac{2P_0}{\pi a^2}\frac{\sqrt{kT_u}}{K}\frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

式中，$P_0$ 为表面吸收的激光辐射功率（W），$k$ 为材料热扩散率（$cm^2/s$），$K$ 为材料热导率（W/cm · ℃ · s），$a$ 为表面光斑的半径，$T_u$ 为激光脉冲的持续时间。

对发散角为 $\theta_0$ 的单模光束，经过一个焦距为 $f$ 的透镜后，其焦斑半径 $a$ 为

$$a = f \cdot \theta_0$$

将上面两公式合在一起，得

$$T_0 = \frac{2P_0}{\pi(F\theta_0)^2} \frac{\sqrt{kT_u}}{K} \frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

从上式可得出，对一定的工件材料，为了达到材料蒸发汽化温度，必须提高辐射功率密度。当激光打孔的功率密度达到 $10^8$ W/cm$^2$ 以上作用到工件表面，使得温度急剧上升，从而引起工件表面的材料瞬时熔化并大量汽化，气压急剧上升，高速气流猛烈向外喷射，在激光作用点上立即形成一个小凹坑。随着激光能量的不断输入，凹坑内的汽化程度加剧，蒸气量急剧增多，气压骤然上升，对凹抗的四周产生强烈的冲击作用，致使高压蒸气带着熔融物，从凹坑底部高速向外喷射，火花飞溅。如同产生一种微型爆破那样，在工件上迅速打出一个具有一定锥度和深度的小孔来。由于蒸气总是先从熔融的凹坑内部向外喷射，起始阶段必然会形成较大的立体角。所以用激光打出来的孔，总是具有一定的锥度，其激光束入口端呈喇叭形。

激光打孔是在极短的时间内完成的，孔的形成是在高功率密度激光的作用下产生的一系列热物理现象相互作用的结果。在高能激光的作用下，材料的汽化蒸发和熔化是激光打孔成形的两个基本过程。其中孔深的延伸主要取决于材料的汽化和蒸发；孔径的扩展主要取决于孔壁的熔化及剩余蒸气压力将熔融材料的喷射排出。当功率密度很高时，蒸发极为旺盛，绝大部分能量用于蒸发，由于热传导引起的能量损失，几乎可以忽略不计。

激光打孔中，到达工件表面的激光功率密度的最佳值应在 $10^8$ ~ $10^9$ W/cm$^2$ 之间。在这个功率密度范围内，材料大部分被汽化，打孔的效果最好。如果激光功率密度低于 $10^8$ W/cm$^2$，大部分激光能量消耗在热传导和使材料熔化上，影响激光打孔的质量；如果功率密度高于 $10^9$ W/cm$^2$，在工件表面会形成等离子体屏蔽层，影响材料吸收光能的效果。

激光打孔方式主要有两种，一种是单脉冲激光打孔方式，另一种是多脉冲激光打孔方式。单脉冲激光打孔方式目前应用较少，原因是单脉冲情况下每次去除材料的数量有限，而如果增大激光功率密度，在材料表面又会出现等离子体屏蔽，影响材料吸收激光能量。另外，单脉冲打孔时，材料在激光作用下产生的熔融物的再凝固，还会引起孔形的畸变和孔径大小的改变。

多脉冲激光打孔使用很普遍。它是采用一组重复周期远远大于材料凝固时间的极短脉冲激光束来进行打孔加工。由于多次脉小激光能量的不断积累，使激光作用区内的材料逐层汽化蒸发，逐渐将孔加深。孔深取决于激光脉冲重复作用的次数，而孔径取决于单个激光脉冲的能量大小。在这种加工方式中，还可以利用激光脉冲之间的时间间隔，及时改变激光焦点在工件上的位置，使得激光焦点的位移量刚好等于被激光

汽化蒸发出来的材料的厚度。因而在激光打孔的全过程中，可始终保持激光在工件上的能量密度不变，以提高打孔精度和质量。

### 3.3.3 激光打孔的工艺参数分析

**1. 激光能量**

激光打孔过程中，激光束的能量对孔的直径和深度均有影响。根据激光与材料相互作用的研究分析，激光打孔的孔径和孔深与激光能量等参数的关系式为

$$d = 2\left[\frac{3E}{x(L_v + 2L_m)}\right]^{1/3}$$

$$h = \left[\frac{3E}{\pi\tan^2\varphi(L_v + 2L_m)}\right]^{1/3}$$

式中　$E$——用于打孔的激光脉冲总能量；

$L_v$——材料的汽化潜热；

$L_m$——材料的熔化潜热；

$\varphi$——激光束进入材料表面的发散半角。

由上式可以看出，在满足到达工件表面的激光功率密度的情况下，增加激光束的能量，不仅使孔深增加，而且孔的直径也随之变大。激光能量的增加可以通过采用多脉冲打孔的方式获得。图3-15为用红宝石激光在宝石上打孔时孔深与脉冲个数的关系曲线。如果要打一个深径比很大的孔，多脉冲打孔比单脉冲打孔的效果要好得多。

**2. 激光光斑大小**

在激光能量一定时，激光光斑大小决定被加工工件上的功率密度，从而影响打孔的孔径和深度。激光波长越短，可获得的激光光斑越小，可以打出的孔越小。因此，波长为1.06μm的Nd-YAG激光器可比波长为10.6μm的$CO_2$激光器打出孔径更小的孔。如果要打孔径还要小的微孔，需采用波长更短的激光器，如准分子激光器或三倍频、四倍频的Nd-YAG激光器等。

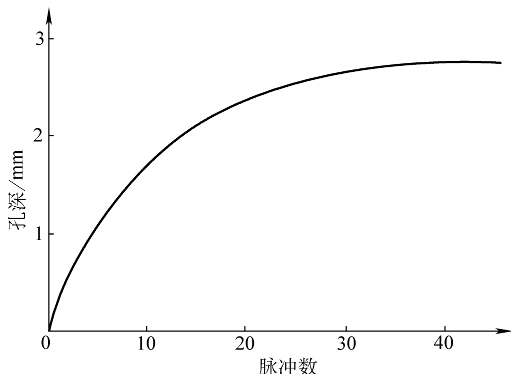



图3-15　用红宝石激光在宝石上打孔时孔深与脉冲个数的关系曲线

激光器的模式的变化可影响聚焦后的光斑大小，从而影响打孔的孔径。一般情况下，激光的模式与激光器的种类有关，并随着激光器输出功率的改变而改变。

**3. 激光脉冲宽度**

当脉冲能量一定时，脉冲宽度对孔的质量影响较大。若脉宽太窄，材料来不及被破坏去除，就打不出孔来；若脉宽太长，则激光功率密度降低，热传导损失所占的比例增大，造成实际用于打孔的激光能量减小，于是，材料汽化部分大大减小，熔化部分显著增加，在激光脉冲结束后，熔化部分又重新凝固，形成再铸造层，结果孔径、

孔深都大大减小，孔壁粗糙度增加，严重时还会将孔堵塞。在激光打孔时，为了避免出现以上两种情况，需要根据不同工件的材料性能，选择合适的脉冲宽度。对于大部分金属材料，脉宽选取在0.2～1ms左右。

**4. 聚焦透镜的焦距**

减小聚焦透镜的焦距也可得到较小的光斑半径。但是，当透镜焦距小到一定值后，透镜像差造成的影响不可忽略。当聚焦透镜的相对孔径小1∶3时。除非采用精心设计的消像差透镜，否则聚焦光斑不会变小。另外，如果透镜焦距很短，会使透镜离工件很近，很容易被打孔过程中的溅出物污染。这时必须要增加保护措施，如采用吹气系统或在透镜和工件之间增加一个容易替换的透明玻璃片等。

**5. 材料特性参数**

1）工件表面的状态。工件表面的状态，影响工件对光的吸收率。表面越光滑，粗糙度越小，对光的反射率越大，激光打孔就越困难。所以，对于表面光滑的加工面，事先应进行黑化处理，以减小加工面的反射率。

2）材料特性参数。材料的物理特性，如导热性、熔点、沸点、比热容、汽化熔化潜热等性能都对激光打孔有较大的影响。研究表明，熔点高、导热性差的陶瓷、宝石、石英玻璃等非金属材料，激光打孔的精度和重复性都很好；而金属材料的导热性较好，打孔加工较为困难。在某些金属上打孔时，由于汽化过程中难以将熔融材料全部清除，孔壁往往留有液相的再铸造层，造成孔的横截面不规则。在用激光对各种不锈钢、中高碳钢、镍基耐热合金等打孔时，孔壁粗糙度低，孔的规则性也很好，因而这些材料适于用激光打孔。

## 3.3.4 激光打孔的特点

1）可加工精度高、深径比大的微小孔，在孔径为4～100μm范围内，打孔的深径比可达50∶1。

2）能加工出微米级的孔，最小的孔径可达0.2μm，而机械钻孔的最小孔径为几十微米。

3）特别适用于加工与工件表面成各种角度（60°～90°）的微小孔、薄壁零件上的微小孔、复合材料的深小孔及硬、脆、软和高强度难加工材料零件的微小孔。

4）能在所有的金属材料及非金属材料上加工微小孔。

5）激光打孔的速度快、效率高，打孔过程一般在毫秒左右的时间就能完成，容易实现自动化，工效是电火花打孔的12～15倍，是机械钻孔的200倍。

6）用汽化方式去除激光打孔中的材料，没有污染。

7）激光打孔的热影响区非常小。

激光打孔的不足主要表现在：

1）激光打孔的孔深及孔深孔径比均受限制。

2）打孔过程中再冷凝的材料及排出物可能会在孔的上边缘出现，影响打孔质量。

3）在某种程度上，激光打出的孔具有一定的锥度。

### 3.3.5 激光打孔的应用

激光打孔在工业生产中具有广泛的应用。例如，用红宝石激光器加工钟表的宝石轴承和在金刚石拉丝模上打孔是激光打孔最早的应用。近年来，许多计算机生产厂都采用了脉冲 $CO_2$ 激光器在印刷电路板上打孔，以提高产品的质量。Nd-YAG 激光器和钕玻璃激光器在各种金属材料上打孔的应用也非常多。下面介绍激光加工燃油喷嘴小孔的实例。

燃气轮机、火箭发动机和内燃机都必须有燃料喷嘴，这些喷嘴有两种作用：一是限定燃料的注入量，这就要求燃料喷嘴小孔有较高的尺寸精度；二是使燃料以一定的角度注入燃烧室，形成涡流，以达到燃料与空气或氧化剂更好地混合，使燃料充分燃烧，这就要求燃料喷嘴小孔与零件有准确的空间位置。制作喷嘴的材料一般为不锈钢等。小孔加工的传统工艺是用钻头钻削，不仅速度慢，费钻头，而且夹具需有钻头导向套，结构复杂。采用激光打孔可以获得满意的效果，并可以提高效率，大大降低工人的劳动强度。

## 3.4 激光清洗技术

激光清洗（Laser Cleaning）是指采用高能激光束照射工件表面，使表面的污物、锈斑或涂层发生瞬间蒸发或剥离，高速有效地清除清洁对象表面的附着物或涂层从而达到洁净的工艺过程。激光清洗过程实际上是激光与物质相互作用的过程，它在很大程度上取决于污染物质在固体表面上的吸附方式。

一般来说，污染物质在器件表面的吸附力有三种，即范德瓦尔斯力、毛细力和双层静电力。范德瓦尔斯力是微米级污染物的主要附着方式，它起因于一个物体中的瞬时偶极矩和另一个物体中感生的偶极矩之间的相互作用；毛细力来自于很薄的液体层在粒子和基体之间的微小空隙处产生的凝聚力；双层静电力是粒子和基体之间由于出现电荷的输运而使得两者带有异号电荷，从而产生的相互吸引的力。因此，这些吸附力都与粒子的直径有关，其数值都比其重力大几个数量级。随着粒子尺度的减小，这些力呈很慢的线性衰减。粒子的尺度越小，清除它所需的加速度就越大。因此，常规清洗方法难以清除尺度如此小的污染物。

传统清洗工业有各种各样的清洗方式，多是利用化学药剂和机械方法进行清洗。在我国环境保护法规要求越来越严格、人们环保和安全意识日益增强的今天，工业生产清洗中可以使用的化学药品种类将变得越来越少。如何寻找更清洁且不具损伤性的清洗方式是我们不得不考虑的问题。激光清洗具有无研磨、非接触、无热效应和适用于各种材质的物体等清洗特点，不需要任何破坏臭氧层的有机溶剂，无污染，无噪声，对人体和环境无害，是一种“绿色”清洗技术。同时，激光清洗可以解决采用传统清洗方式无法解决的问题。例如，工件表面粘有亚微米级的污染颗粒时，这些颗粒往往粘得很牢，常规的清洗办法不能够将它去除，而用纳米激光辐射工件表面进行清洗则非常有效。另外，由于激光是对工件进行无接触清洗，对精密工件或其精细部位清洗

十分安全，可以确保其精度。所以激光清洗在清洗行业中独具优势。

激光清洗具有如下优点：

1）选择性清除污物，不损伤被清洗物体本身。

2）定位准确，范围可控，甚至能够清除纳米级的微粒。

3）实时控制和反馈，除污作业自动化。

4）多用途，能够清除多种类型的污物且效果良好。

5）高效率，低成本，无耗材。

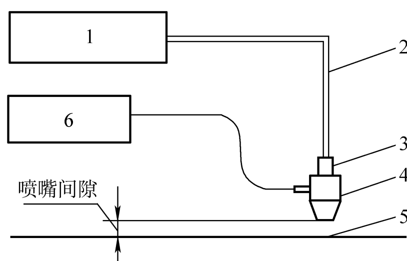



图 3-16　激光清洗工作原理示意图
1—激光器　2—光纤　3—聚焦镜头　4—清洗喷嘴　5—清洗工件　6—辅助气源

## 3.4.1　激光清洗的工作原理

激光清洗机理主要是基于物体表面污染物吸收激光能量后，或汽化挥发，或瞬间受热膨胀而克服表面对粒子的吸附力，使其脱离物体表面，达到清洗的目的。激光清洗系统的工作原理如图 3-16 所示。

激光器 1 产生的激光经可弯曲的光纤 2 传输到聚焦透镜 3，聚焦后从清洗喷嘴 4 的内孔抵达清洗工件 5 的表面。通常使用吹气喷嘴，借助于与激光同轴的小孔喷嘴将具有一定压力的气体吹到清洗区。气体由辅助气源 6 供给，吹气的主要作用是吹去气化物，并防止镜头被飞溅物和烟尘污染，同时还可带走氧化所放出的热量或防止表面氧化，起到净化表面、强化激光与材料的热作用。

图 3-17 为南开大学研发的激光除污机，可清洗多种污物，尤其是在激光脱漆除锈方面，效果良好。

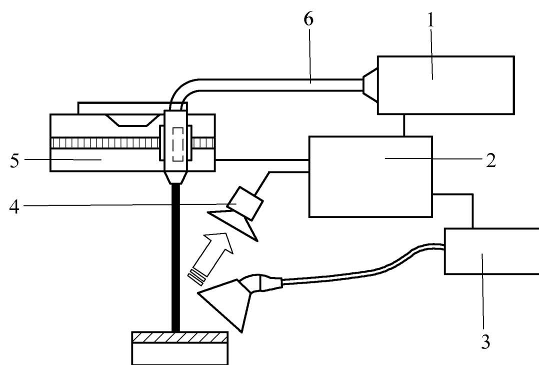



图 3-17　超声检测窄脉宽激光除污机结构示意图
1—窄脉宽激光器装置　2—自动控制装置　3—吸尘回收装置　4—超声检测装置　5—移动平台装置　6—光束调整传输装置

## 3.4.2　激光清洗的分类

从清洗机理上，激光清洗可分为两大类，一类是利用清洁基片与表面附着物（污物）对某一波长的激光能量具有差别很大的吸收系数。辐射到表面的激光能量，大部分被表面附着物所吸收，使之受热或汽化蒸发或瞬间膨胀并被表面形成的蒸气流带动脱离物体表面，从而达到清洗目的。而基片由于对该波长的激光吸收能量极小，所以不会被损伤。对此类激光清洗选择合适的波长和控制好激光能量，是实现安全高效清洗的关键。

另一类是适用于清洁基片与表面附着物的激光能量吸收系数差别不大或基片对涂

层受热形成的酸性蒸气较敏感，或涂层受热后会产生有毒物质等情况的清洗方法。该类方法通常是利用高功率、高重复率的脉冲激光冲击被清洗的表面，使部分光束转换成声波。声波击中下层硬表面后，返回的部分与激光产生的入射声波发生干涉产生高能波，使涂层发生微小爆炸。涂层被粉碎，压成粉末，再被真空泵清除，而底下的基片不会损伤。

激光清洗可以做到：

1）汽化污物，清洁表面。根据不同污物，选择不同的激光辐射功率密度。一般可按打孔、切割、焊接和表面改性的顺序递减。激光清洗与表面改性应为一个档次，由于激光清洗属于热加工范畴，因此，在停止激光照射后，材料的表面部位需要经过冷却过程。

2）清洗、改性一举两得。在激光清洗过程中，激光的热作用可使金属表面相变硬化或进行退火与淬火，从而改善材料的表面性质，提高金属的硬度或抗腐蚀能力。目前，激光切割能达到比较经济的表面粗糙度 $R_a$ 为 12.5 ~ 25μm，随着激光加工工艺的发展，可使表面粗糙度 $R_a$ 达到 3.2 ~ 6.3μm。

## 3.4.3 激光清洗的方法

激光清洗方法有 4 种：

1）激光干洗法，即采用脉冲激光直接辐射去污。

2）激光 + 液膜方法，即首先沉积一层液膜于基体表面，然后用激光辐射去污。

3）激光 + 惰性气体的方法，即在激光辐射的同时，用惰性气体吹向基体表面，当污物从表面剥离后会立即被气体吹离表面，以避免表面被再次污染和氧化。

4）运用激光使污垢松散后，再用非腐蚀性化学方法清洗。

目前在工业生产中主要采用前 3 种清洗方法，其中激光干洗法和激光 + 液膜清洗方法用得最多，第 4 种方法仅见于艺术品的清洗保护。

## 3.4.4 激光清洗的应用

### 1. 激光清洗硬盘磁头

计算机硬盘磁头在使用过程中，磁头表面产生的污染大致分 3 种：

1）难以去除的有机胶如环氧树脂。

2）研磨加工过程中产生的辐射残渣包括硅微粒和有机油脂。

3）深嵌于表面的金属污染物（通常是锡）。

由于这些污染物的存在，使飞溅深度增大，减少了磁记录密度。另外污染物碰撞硬盘表面，易破坏磁盘的光滑表面层和中间层，导致磁录的可靠性下降。

采用脉宽为 23ns、最大能量密度为 450mJ/cm$^2$ 的 KrF 准分子激光，是一种有效去除磁头污染、不引起任何表面损伤的清洗方法。在光学显微镜下观察，能量密度为 450mJ/cm$^2$ 时，25 个激光脉冲便可以清除掉磁头的环氧树脂污染物；能量密度为 330mJ/cm$^2$ 时，30 个脉冲就可以去除掉辐射残渣，并且边缘整齐，没有任何表面损伤；金属污染与磁头表面结合较紧密，但能量密度为 187.5mJ/cm$^2$，脉冲频率为 30Hz 时，

用 5s 就可以有效清除掉锡金属污物。

**2. 激光清洗硅晶体表面**

晶体硅是半导体行业中常用的材料，它的表面多是一些氧化物和碳氢化合物，在高温下易形成碳化硅等污染层。用离子喷射的方法可以去除硅表面的碳氢化合物，但易引起硅表面的粗糙或损伤；用化学清洗的方法，虽然可以去除表面氧化层，但又会生成化学钝化层等。用波长为 248nm，脉宽为 20ns 的 KrF 准分子激光清洗硅晶体表面，能量密度为 $800mJ/cm^2$ 时，有 15 个激光脉冲就可以去除表面氧化层。通过电镜扫描分析，表面层中的 F、C、O 成分完全消失，并且没有任何表面损伤。

**3. 激光清洗金属表面锈蚀**

传统的金属表面除锈方法是用钢刷或喷砂等，工程庞大而复杂，并且锈粉不仅有害于工人的身体健康，而且严重污染环境。用直径为 12mm 的激光束照射钢铁大桥、铁塔等钢架结构的金属表面，可瞬间去除锈层，并且可以改善金属表面的抗锈能力。

**4. 激光清除海面石油污染**

用燃烧的方法清除泄漏在海面上的石油，不仅造成资源浪费，而且会生成有害气体，污染空气和海洋。激光清除石油的方法是通过控制激光能量，使石油受热蒸发而不燃烧，然后用真空回收装置收集石油蒸汽并冷却。若油层较厚，可采用大功率激光下到石油层底下进行扫描，石油层会形成浓缩的石油膜，而海水在激光作用下受热沸腾，使得石油膜被高高托起，此时用过滤收集石油膜的特殊装置进行收集。激光清洗速度快、效率高，将激光清洗设备装在船舶上一天可清除数十平方公里的海面。

**5. 激光清除旧油漆**

在飞机、轮船、机车、雷达系统等设备的维修保养中，经常要遇到除去旧油漆这一问题。传统的机械除漆和化学除漆存在污染大、劳动强度大、效率低、费用高且容易损害设备表面等弊病。采用激光除去旧油漆，激光使油漆表面加热并令其有机成分汽化，使粘合剂失去作用，无机填充物和颜料被夹在有机成分的蒸汽中而脱离物体表面，从而达到除去油漆的目的。激光除漆的关键是有效地控制激光能量，使除漆时不损伤油漆下物体表面。

**6. 激光清洗武器**

激光清洗技术在武器维护保养上也有应用。采用激光清洗技术可以高效、快捷地清除污染物，清除部位可以进行选择，实现清洗的自动化。激光清洗不但清洁度高于化学清洗工艺，而且对于机体表面几乎无损害，还可在金属机体表面形成一层致密的氧化物保护膜，提高表面强度。激光清除的废料是固体粉末，体积小，易于存放，对环境基本上不造成污染，还可以进行远距离操作，有效减少对操作人员的健康损害。

**7. 激光清洗石材**

石雕和石刻等年代久远的高档石质艺术品，由于其极精细和易损的表面结构，成为激光清洗技术应用最早的领域。人们发现，用激光清除石质文物表面的污垢有其独特的优势。它能够十分精确地控制光束在复杂的表面上移动，清除污垢而不损伤文物石材。例如，1992 年 9 月，联合国教科文组织的世界文化遗产保护组织为纪念该组织创建 20 周年，对十分著名的英国亚眠大教堂进行了维修，亚眠大教堂西侧圣母门十分

精美的大理石雕刻是工程的关键。在为期一年的圣母门维修工程中，维修人员借助激光，用激光光束除去了覆盖在大理石雕刻花纹上几毫米厚的黑色垢层，使大理石表面原来的色泽体现出来，让精美的雕刻重现光彩。图 3-18 为清洗前后的效果。

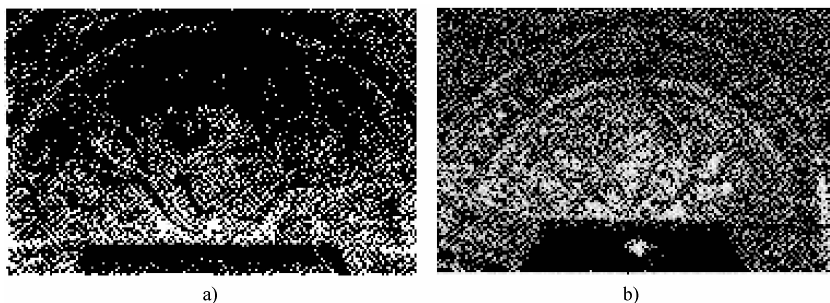


图 3-18 激光清洗前、后的效果
a）清洗前 b）清洗后

人们用电子显微镜观察激光清洗后的石雕表面发现，激光清洗后，石头的结构没有变化，被清洗的表面既光滑又平坦，没有损伤。这与用微粒子喷射法（喷砂法）清洗后的表面完全不同。微粒子喷射法清洗后难以避免大理石表面结构的损伤，特别是对已有硫酸盐垢层的大理石表面。电子显微镜的观察还发现，激光照射后，表层下岩石材料的各项性质既无退化，也无改变。目前，用激光清洗石灰石、大理石等高档石质材料表面污垢的工作已成为一项新的，很有前途的业务项目。除了对石质材料的清洗外，激光清洗在玻璃、石英、金属、模具、牙齿、芯片、电极、磁头、磁盘，以及各种微电子产品的清洗中都有很好的效果，已经有了一定的应用。图 3-19 为激光清洗前后的石雕像照片。

**8. 激光清洗核电站反应堆内管道**

激光清洗系统在核电站反应堆内管道的清洗上也有应用。采用光导纤维，将高功率激光束引入反应堆内部，直接清除放射性粉尘，清洗下来的物质清理方便，而且由于是远距离操作，可以确保工作人员的安全。

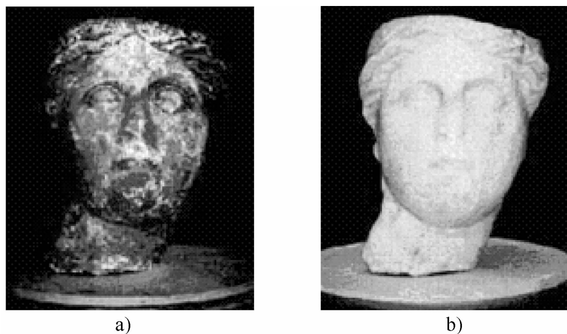


图 3-19 激光清洗前后的石雕像照片
a）清洗前 b）清洗后

**9. 激光清洗古代文献**

1967 年 12 月，洪水涌入位于葡萄牙里斯本的 Calouste Gulbenkian 基金会，使一批 16 世纪的伊斯兰手稿蒙上一层泥土。管理人员花费了数年时间试图清洗这些极具价值的纸和羊皮纸。他们刮去泥土并使用化学溶剂。但是使用这些方法在清除泥土的同时也会使文献上的墨水溶剂渗入并破坏纸张或羊皮纸。于是，葡萄牙光学科技中心的研究者使用波长为 248nm 的激光

来清理这些文献，光束通过有长方形隙缝的掩膜除去低能部分，然后通过焦距为 200mm 的透镜聚焦，在 1.3mm × 4mm 的文献上产生光点。传递的平均能量密度为 $30mJ/mm^2$，170mJ 的脉冲重复率为 9Hz。每一脉冲持续 10ms，传至文献的紫外辐射约 94% 被泥土吸收，超过了杂质结合能的临界值，使这些物质碎成颗粒被吹走。每一脉冲的穿透深度为 0.1μm。科学家们用一台动态频谱范围为 400 ~ 700nm、光谱带宽为 15nm 的光谱色度计来研究文献的不同区域。初步测量后，将文献置于温度和湿度保持稳定的房间内进一步阅读。观察文献的不同区域，在处理这些区域时除承受的脉冲数目不同外其余的都相同。例如，在纸的一点上脉冲数目为 2728，另一点为 7231。在羊皮纸上脉冲数目的变化从 3851 至 12523。研究者在 1996 年 10 月至 1998 年 10 月跟踪了文献的色值和反射率，发现开始时反射率有所增加，而浅红色调有所加强，随着时间的推移反射率恢复原值，红色亦逐渐淡化。进行清除后，纸张会变得更白，但老化的过程随之而来，颜色慢慢变得更像未经处理的区域。与羊皮纸相比，纸张对清除过程更加敏感。在葡萄牙国家档案局正在开展旨在研究其他古代文献的激光清洗项目，还把类似技术用于古代陶瓷。

**10. 激光定期清洗模具**

工业上还用激光对模具进行定期清洗，以保证产品的质量。以激光清洗轮胎模具为例，说明激光清洗与脱机喷砂清洗和干冰清洗设备相比的经济效益。激光清洗技术具有明显优势：清洗快速，劳动强度低，无磨损，对操作员无危险。然而，设备的首期投资较高，达 30 ~ 60 万美元。因此工厂需要确立一个合理的投资回收计划。典型的 JET 激光系统工厂可以在 18 个月内收回投资。硫化机停工时间短，劳动力成本低，模具磨损少，以及较低的生产成本是潜在的效益。譬如，一台日产 20000 条轮胎的设备，按 8 台硫化机（16 模）每天平均清洗一次的要求，假设每班清洗 3 台硫化机或每天清洗 9 台硫化机（有的工厂清洗两次），从硫化机上拆下两半模具进行脱机清洗，大约需要 15h 的清洗作业和 10h 的停机时间。如采用激光对两半模具进行清洗，则需要 0.3h 的清洗作业和 3h 的停机时间，这样，清洗完一台硫化机就可以节约 14h 的清洗作业和 7h 的停机时间。又假设，只做 10 次清洗（5 台硫化机），5 次在模具车间进行脱机清洗，采用激光清洗将产生巨大的回报：每天可节约 70h 的清洗作业和 35h 的停机时间。那么按一年 320 天的工作日算，每年可增加 22400h 生产作业和 11200h 的上机时间。

## 3.5　激光焊接技术

激光焊接（Laser Welding）技术采用高能激光产生的光束，使材料熔融并连接，形成优良焊接接头的工艺过程。激光焊接的能量密度高，激光光斑直径小，其能量密度比常规方法高 100 倍以上，同时，可以形成 0.5mm 宽的焊道。激光焊接技术具有溶池净化效应，能净化焊缝金属，适用于相同或不同金属材料间的焊接。激光焊接能量密度高，对高熔点、高反射率、高导热率和物理特性相差很大的金属焊接特别有利。因此，激光焊接具有传统焊接方法所无法比拟的优点，如焊速快，工件变形小，焊缝

的熔合比大，晶粒细小，焊后处理简单，焊缝质量好等特点。低碳钢板的深冲性能与韧性一般优于母材，激光焊接能够在各种特殊环境下焊接相同或不同材料或难熔材料，实现不等厚度材料的焊接。

## 3.5.1　激光焊接原理

激光焊接的原理是利用高辐射强度的激光束，经过光学系统聚焦后，激光照射到加工工件上，使工件受热熔化，然后冷却得到焊接。激光焦点的功率密度为 $10^4 \sim 10^7$ W/$cm^2$。熔化现象能否产生和产生的强弱程度主要取决于激光作用材料表面的时间、功率密度和峰值功率。控制上述各参数就可利用激光进行各种不同的焊接加工。图 3-20 为激光焊接示意图。

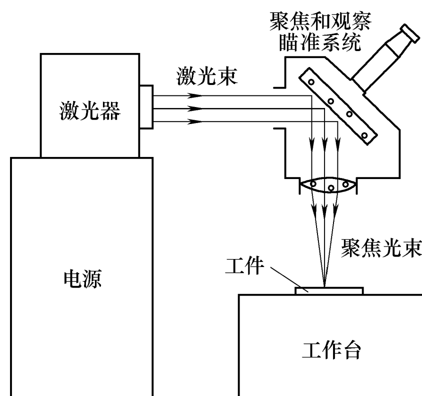



图 3-20　激光焊接示意图

## 3.5.2　激光焊接特点

激光焊接是利用激光束作为热源的一种热加工工艺，它与电子束、等离子束和一般机械加工相比较，具有许多优点。

1）激光束的激光焦点光斑小（0.1 ~ 0.3mm），功率密度高，比电弧焊（5 × 102 ~ 104W/$cm^2$）高几个数量级，因此激光焊接具有传统焊接方法无法比拟的显著优点，能焊接一些高熔点、高强度的合金材料。

2）激光焊接是无接触加工，没有工具损耗和工具调换等问题。激光束能量可调，移动速度可调，可以进行多种焊接加工。

3）具有高度柔性，自动化程度高，可以用计算机进行控制，焊接速度快，功效高，可方便地进行任何复杂形状的焊接。

4）加热范围小，焊缝和热影响区窄，接头性能优良。激光焊缝图如图 3-21 所示。



图 3-21　平滑的激光焊缝

5）残余应力和焊接变形小，可以实现高精度焊接。

6）激光束易于导向、聚焦，实现各方向变换。

7）激光焊接与电子束加工相比较，不需要严格的真空设备系统，不产生 x 射线，操作方便，更适合在生产中推广应用。

8）可对高熔点、高热导率、热敏感材料及非金属进行焊接，焊接速度快，生产率高。

### 3.5.3　激光焊接设备

激光焊接设备主要由激光器、导光系统、焊接机和控制系统组成。激光焊接设备如图 3-22 所示。

1）激光焊接设备的关键是大功率激光器，主要有两大类，一类是固体激光器，又称为 Nd-YAG 激光器。Nd（钕）是一种稀土族元素，YAG 代表钇铝柘榴石，晶体结构与红宝石相似。Nd-YAG 激光器波长为 1.06μm，主要优点是产生的光束可以通过光纤传送，因此可以省去复杂的光束传送系统，适用于柔性制造系统或远程加工，通常用于焊接精度要求比较高的工件。汽车工业常用输出功率为 3～4kW 的 Nd-YAG 激光器。另一类是气体激光器，又称为 $CO_2$ 激光器，分子气体作工作介质，产生平均为 10.6μm 的红外激光，可以连续工作并输出很高的功率，标准激光功率在 2～5kW 之间。表 3-4 给出了 $CO_2$ 气体激光器和 YAG 固体激光器的性能比较。




图 3-22　激光焊接设备

**表 3-4　$CO_2$ 气体激光器和 YAG 固体激光器性能比较**

| — | 波长/μm | 可输出功率 | 光束质量 | 光纤传输 | 光学部件 | 运行消耗和维护 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $CO_2$ 激光器 | 10.6 | 大 | 好 | 不可 | 需选特殊材料的光学部件（ZnSn，GaAs 等），贵 | 需消耗气体；清理电极较麻烦 |
| YAG 激光器 | 1.06 | 小 | 次之 | 可 | 可用普通光学部件制造，便宜 | 只需必要时更换泵浦灯，维护简单 |

激光器最重要的性能是输出功率和光束质量。从这两方面考虑，$CO_2$ 激光器比 YAG 激光器具有更大优势，是目前深熔焊接主要采用的激光器，生产上应用的大多数还处在 1.5～6kW 范围，但现在世界上最大的 $CO_2$ 激光器已达 50kW。而 YAG 激光器在过去相当长一段时间内提高功率有困难，一般功率小于 1kW，用于薄小零件的微连接。但是，近几年来，国外 YAG 激光器最大功率已达 5kW，并已投入市场。由于 YAG 激光器的激光波长短，仅为 $CO_2$ 激光的 1/10，有利于金属表面吸收，可以用光纤传输，使导光系统大为简化。

2）导光和聚焦系统。导光聚焦系统由圆偏振镜、扩束镜、反射镜或光纤、聚焦镜等组成，实现改变光束偏振状态、方向，传输光束和聚焦的功能。这些光学零件的状况对激光焊接质量有极其重要的影响。在大功率激光作用下，光学部件，尤其是透镜性能会劣化使透过率下降；会产生热透镜效应（透镜受热膨胀，焦距缩短）；表面污染

也会增加传输损耗。所以光学部件的质量维护和工作状态监测对保证焊接质量至关重要。

3）激光焊接机。它的作用是实现光束与工件之间的相对运动，完成激光焊接。激光焊接机分焊接专机和通用焊接机两种，后者常采用数控系统，有直角坐标二维、三维焊接机或关节型激光焊接机器人。

### 3.5.4　激光焊接工艺

激光焊接分为脉冲激光焊接和连续激光焊接，在连续焊接中又可分为热传导焊接和深穿透焊接。

按焊接熔池形成的机理区分，激光焊接有两种基本模式：热导焊和深熔焊。热导焊所用激光功率密度较低（$10^5 \sim 10^6 W/cm^2$），工件吸收激光后，仅使表面熔化，然后依靠热传导向工件内部传递热量形成熔池。这种焊接模式熔深浅，深宽比较小。

深熔焊激光功率密度高（$10^6 \sim 10^7 W/cm^2$），工件吸收激光后迅速熔化乃至汽化，熔化的金属在蒸气压力作用下形成小孔，激光束可直照孔底，使小孔不断延伸，直至小孔内的蒸气压力与液体金属的表面张力和重力平衡为止。小孔随着激光束沿焊接方向移动时，小孔前方熔化的金属绕过小孔流向后方，凝固后形成焊缝。这种焊接模式熔深大，深宽比也大。在机械制造领域，除了那些微薄零件之外，一般应选用深熔焊。

激光焊接的工艺参数主要有如下几种：

1）功率密度。功率密度是激光加工中最关键的参数之一。采用较高的功率密度，在微秒时间范围内，表层即可加热至沸点，产生大量汽化。因此，高功率密度对于材料去除加工，如打孔、切割、雕刻有利。对于较低功率密度的激光焊接，表层温度达到沸点需要经历数毫秒，在表层汽化前，底层达到熔点，易形成良好的熔融焊接。因此，在传导型激光焊接中，功率密度的范围在 $10^4 \sim 10^6 W/cm^2$。

2）激光脉冲波形。激光脉冲波形在激光焊接中是一个重要问题，尤其对于薄片焊接更为重要。当高强度激光束照射至材料表面，金属表面将会有 60% ~98% 的激光能量反射而损失掉，且反射率随表面温度变化。在一个激光脉冲作用期间内，金属反射率的变化很大。

3）激光脉冲宽度。脉宽是脉冲激光焊接的重要参数之一，它既是区别于材料去除和材料熔化的重要参数，也是决定加工设备造价及体积的关键参数。

4）离焦量对焊接质量的影响。激光焊接通常需要一定的离焦量，因为激光焦点处光斑中心的功率密度过高，容易蒸发成孔。离开激光焦点的各平面上，功率密度分布相对均匀。

离焦方式有正离焦与负离焦两种。焦平面位于工件上方为正离焦，反之为负离焦。按几何光学理论，当正、负离焦平面与焊接平面距离相等时，所对应平面上的功率密度近似相同，但实际上所获得的熔池形状不同。负离焦时，可获得更大的熔深，这与熔池的形成过程有关。实验表明，激光加热 50 ~200μs 材料开始熔化，形成液相金属并出现汽化，形成高压蒸汽，并以极高的速度喷射，发出耀眼的白光。与此同时，高

浓度气体使液相金属运动至熔池边缘，在熔池中心形成凹陷。当负离焦时，材料内部功率密度比表面还高，易形成更强的熔化、汽化，使光能向材料更深处传递。所以在实际应用中，当要求熔深较大时，采用负离焦；焊接薄材料时，宜用正离焦。

### 3.5.5　激光焊接的应用

激光焊接技术在制造领域的应用正稳步增长，由脉冲到连续，由小功率到大功率，由薄板到厚件，由简单单缝到复杂形状，激光焊接在不断的演化过程中已经逐步成为一种成熟的现代加工工艺技术。随着激光输出功率的提高，特别是高功率 $CO_2$ 激光器的出现，激光深穿透技术在国内外都得到了迅速发展，最大的焊接深宽比已经达到了 12∶1，激光焊接材料也由一般低碳钢发展到了今天的焊接镀锌板、铝板、钛板、铜板和陶瓷材料，激光焊接速度也达到了每分钟几十米。激光焊接技术日益成熟，并大量应用到生产线上。在汽车生产线上，如齿轮焊接、汽车底板及结构件（包括车门车身）的高速拼焊已取得了巨大的经济效益和社会效益。

激光焊接技术对传统的汽车焊接工艺带来了冲击。激光焊接技术在焊接铝材、用焊接件代替铸件以及全车身构架结构焊接的应用前途最大。目前，激光焊接在汽车工业中已成为标准工艺。激光用于车身面板的焊接，可将不同厚度和具有不同表面涂镀层的金属板焊在一起，然后再进行冲压，这样制成的面板结构能达到最合理的金属组合。激光焊接的速度约为 4.5m/min，而且很少变形，省去了二次加工。激光焊接加速了用冲压零件代替锻造零件的进程。车身装配中的大量点焊，把两个焊头夹在工件边缘上进行焊接，凸缘宽度需要 16mm；而激光焊接是单边焊接，只需要 5mm。把点焊改为激光焊，每辆车就可以节省钢材 40kg。用传统点焊焊接两片 0.8mm 的钢板冲压件，平均速度为 20 点/min，焊距为 25mm，即速度为 0.5m/min。用激光焊速度可以达到 5m/min 以上。图 3-23 为上海大众汽车公司的焊接生产线的车身焊接。

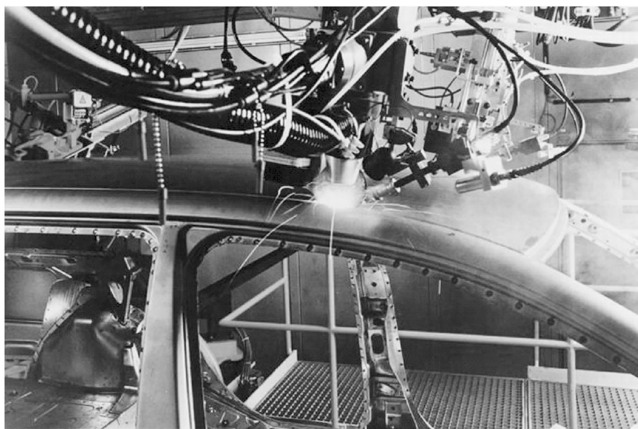


图 3-23　上海大众汽车公司的汽车车身焊接

采用激光焊接技术，不仅可降低成本，还大大提高了生产效率。激光焊接用于车顶外壳与框架焊接、传动转换器盖板的焊接，由 CNC 控制，其循环时间约为 16s，实

际焊接时间仅为 3s，一天可连续运行 24h。激光焊接用于焊接小轿车的变速器总成和底盘，激光束的焊接速度快，易于自动化控制，并且易于归并到一个灵活的制造系统中。激光焊接改进了厂家的产品设计投产周期，降低了成品的废品率。

图 3-24 所示为汽车齿轮的激光焊接。目前世界各大汽车制造厂竞相采用激光焊接齿轮，取代电阻焊、感应焊、电子束焊等工艺方法，以提高产品在国际市场上的竞争力。齿轮焊接既可减少零件数量，又能提高齿轮质量，降低齿轮的制造成本。与传统焊接工艺相比，激光焊接齿轮无需在真空中进行，可避免焊接变形，焊接后的齿轮无需再精加工。激光焊接可使焊缝深宽比高达 10∶1，且焊缝处具有相当或优于母材的综合力学性能，保证了齿轮可以传递较大的转矩。

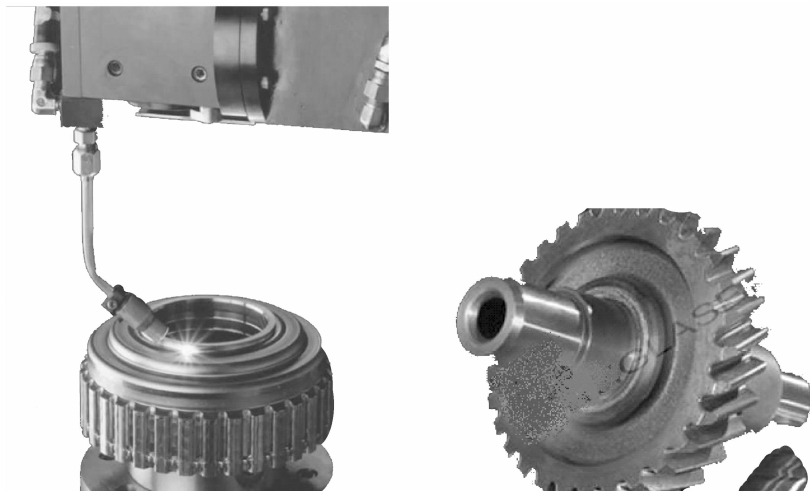


图 3-24　汽车齿轮的激光焊接

## 3.6　激光快速成形技术

快速成形（Rapid Prototyping，RP）技术是 20 世纪 80 年代末发展起来的数字制造工艺技术，它是集计算机技术、激光技术、光扫描和光化学四大高新技术于一身的综合性很强的高新技术。它先把零件的三维数字模型进行离散化，然后按照数字积分的思路进行逐层加工。利用这一技术可以在计算机控制下，迅速将 CAD 数字模型变为零件的物理模型。因而 CAD→RP 原型→评价→CAD 修改模式已逐渐成为保证一次设计成功的新设计模式。

这一技术的发展带来了制造业的革命性进步，一是使制造过程可脱离车间而在办公室内进行，设计和制造过程可交叉并行，从而缩短产品生产周期。二是可制造出更为复杂的零部件和较为抽象的艺术模型，而这种模型用传统的制造方法无法实现。与传统制造方法相比，激光快速成形技术具有如下特征：①原型的复制性、互换性高；②制造工艺与制造原型的几何形状无关；③加工周期短、成本低，一般制造费用可降低 50%，加工周期缩短 70% 以上；④高度技术集成，实现设计和制造一体化。

## 3.6.1　激光快速成形的基本原理和特点

### 1. 基本原理

激光快速成形技术是利用快速成形（RP）系统把设计的三维构件实体模型快速转化为实体原型的一种高新技术。与传统的去除成形不同，快速成形技术是一种“离散-堆积”的成形过程，其基本原理如图 3-25 所示。

首先，由 CAD 软件设计出零件的实体模型，然后将此模型沿某方向（通常为 $Z$ 向）离散成一系列有序的二维层面，根据每个层面的轮廓信息，进行工艺规划，选择合适的加工参数，自动生成数控代码，最后由快速成形机接受代码指令，制造出一系列层面，并自动将它们连续起来，得到一个三维物理实体。其基本过程如图 3-26 所示。

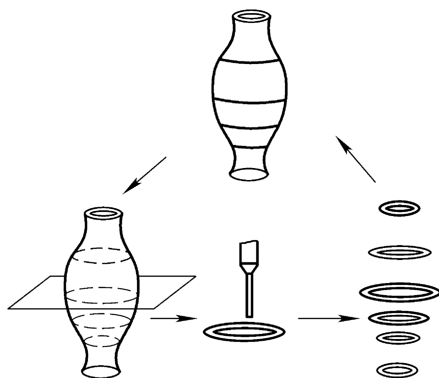


图 3-25　激光快速成形技术基本原理

### 2. 激光快速成形的特点

1）激光快速成形系统在产品制作过程中，可将复杂的三维立体构件拆分成若干薄层，使其具有二维平面特点，简化了加工工艺。使用该技术可以制作几何形状任意复杂的微灌灌水器件，而不受传统机械加工方法中刀具无法达到某些型面的限制。

2）在曲面制造过程中，CAD 数据的转化（分层）可全自动完成，而不像数控加工中，需要高级工程人员数天复杂的人工辅助劳动才能转化为完全的工艺数控代码。

3）任意复杂器件的加工只需在一台设备上完成，不需要传统的刀具或工装等生产准备工作，从而大大地缩短了新产品的开发成本和周期，其加工效率亦远胜于数控加工。

4）通过产品的快速成形制作，可以对灌水器件设计进行快速评价、修改及性能试验，有效地缩短了微灌产品的研发周期。

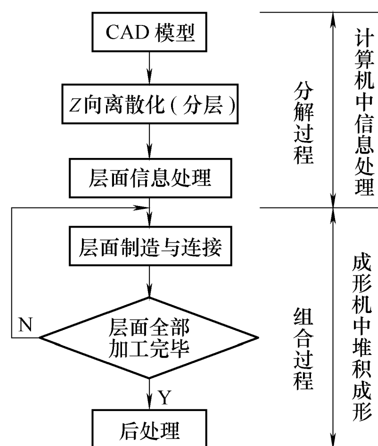



图 3-26　快速成形的基本过程

5）在激光快速成形系统中，使用光敏树脂材料制成的器件原型具有足够的强度，可直接用于流体力学性能测试或田间测试试验。

## 3.6.2　激光快速成形的工艺

近十年来，快速成形技术已从最初单一工艺发展为多种工艺，不论是工艺过程还是加工材料，均有所发展，使快速成形技术更加丰富，可选择材料更多，适应性更强。

目前，国际上广泛流行的激光快速成形技术主要有激光立体光刻、选择性激光烧结法、分层实体制造法等工艺。

**1. 激光立体光刻**（SLA）

激光立体光刻（Stereo Lithography Apparatus，SLA）又称为激光立体造型或立体平版印刷法，也称为“液态光敏树脂固化成形法”。它是美国 3D 公司最早开发出的一种快速成形技术，主要是利用某些光敏树脂在一定频率单色光的照射下迅速固化的特性。SLA 的工作原理如图 3-27 所示。可升降的工作台处于光敏树脂液面下一个截面层厚（约 0.1mm）的高度，聚焦后的紫外激光束在计算机的控制下，按某一截面轮廓的数据在光敏树脂液面上进行扫描，被扫描区域的光敏树脂迅速固化，得到该截面的轮廓；然后，工作台下降一个截面层的高度，其上面再覆盖上另一层液态树脂，再进行该层的扫描和固化；先后固化的两层截面轮廓牢固地粘结在一起。如此反复，直到得到整个产品的树脂基立体原型。

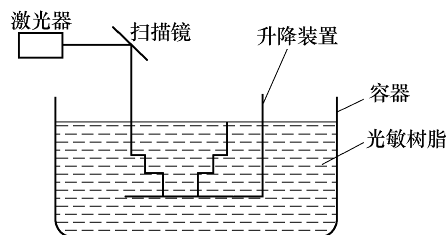



图 3-27　SLA 的工作原理

该工艺由于采用液态材料，所以制造精度较高，目前可达 ±0.1mm，主要是为产品提供样品和实验模型。但由于必须对整个截面进行扫描，加工时间较长；所制样件易翘曲，需要修正；必须设计出样件的支撑结构，以确保在加工过程中样件的可靠定位。其加工产品如图 3-28 所示。

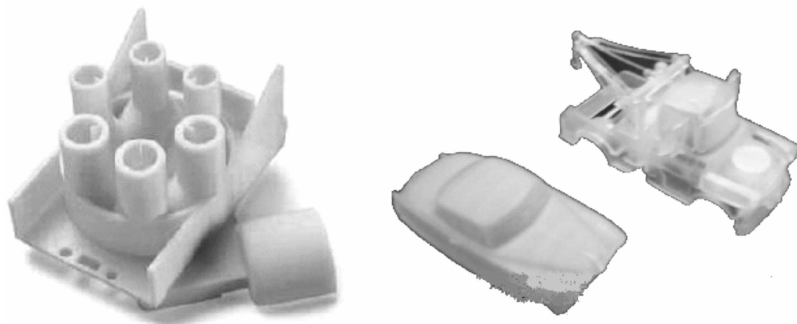


图 3-28　SLA 产品

SLA 方法是目前快速成形技术领域中研究得最多的方法，也是技术上最为成熟的方法。SLA 工艺成形的零件精度较高，多年的研究改进了截面扫描方式和树脂成形性能，使该工艺的加工精度能达到 0.1mm。但这种方法也有自身的局限性，如需要支撑，树脂收缩导致精度下降，有的光固化树脂有一定的毒性等。

**2. 选择性激光烧结法**（SLS）

选择性激光烧结法（Selected Laser Sintering，SLS）的原理与 SLA 法基本相同，是用 $CO_2$ 激光熔融烧结树脂粉末的方式制作样件，其成形原理如图 3-29 所示。工作时，

采用滚筒将粉末铺撒成薄薄的一层，其厚度等于切片高度，然后激光根据层面的几何形状有选择地对材料进行扫描，使粉末熔化，并粘结在下层材料上，而未被激光扫描烧结的粉末则作为零件的支撑体。在完成一层烧结后，工作台下降一个切片厚度，重新铺粉、烧结。不断重复上述过程，直到烧结出整个零件。

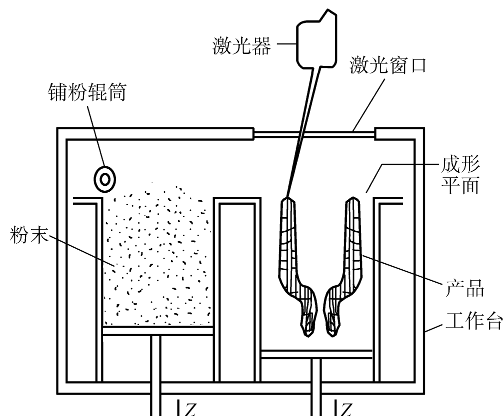
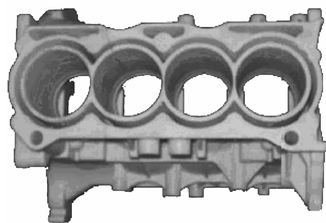


图3-29　选择性激光烧结法（SLS）的成形原理

该工艺的所用激光器是低功率的$CO_2$激光器。所用材料种类较多，可得到不同材质的设计原型。如果材料为细砂与光敏树脂的混合粉，所得原型则可以是砂型（芯），直接浇注或经组合后浇注即可得到铸件；如果材料是金属粉，所得原型甚至可以直接使用。该工艺比较适合小型样件制造，样件的加工时间与SLA法相近，所得制件需要进行后处理才能保证精度及进一步使用，图3-30所示为采用SLS技术生成的四缸发动机。

由于该类成形方法具有制造工艺简单、柔性度高、材料选择范围广、材料价格便宜、成本低、材料利用率高、成型速度快等特点，SLS法应用于铸造业可以用来直接制作快速模具。美国克莱斯勒公司和通用机器公司应用SLS法来减少新型汽车发动机零件的开发费用。克莱斯勒公司利用SLS法制成蜡模，生产形状很复杂的汽车进排气管。通用机器公司也用这种方法来制造航天器上的复杂零件。美国的Rorketdyhe公司甚至用蜡和尼龙来做复杂的六缸气缸体模样，然后用熔模铸造的方法生产铸件。


图3-30　SLS产品

### 3. 分层实体制造法（LOM）

分层实体制造（Laminated Object Manufacturing，LOM），也称为薄片材料成形法，所用材料以纸张为主。LOM法的工艺过程是在工作台上平铺一层纸，计算机依据模型的截面轮廓数据控制$CO_2$激光束对材料进行边线切割；一层切割完毕后，工作台下降一层纸的高度，再铺上另一层纸；纸张背面涂覆有一薄层粘结剂，将纸张相互粘结在一起，纸张逐层加工，最终得到所设计的模型。原理如图3-31所示。

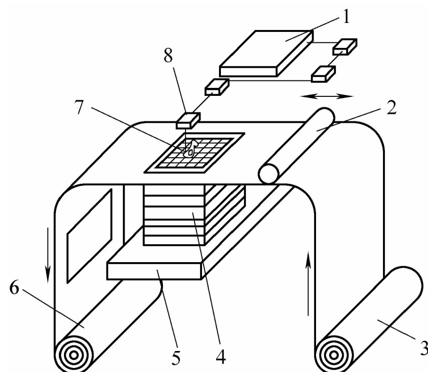


图3-31　分层实体制造原理

1—$CO_2$激光器　2—热压辊　3—纸原料　4—成形块　5—升降工作台　6—废料　7—模型当前加工表面　8—$x$-$y$扫描头

LOM法与SLA法或SLS法有所不同。SLA或SLS法扫描的是截面轮廓内的面积，

而 LOM 法加工的是截面轮廓的边线；SLA 或 SLS 法是对材料进行扫描使其固化、相互粘结，而 LOM 法是对材料进行切割、使之分离；LOM 法所用材料为纸张，并且工艺成形时间短，翘曲变形小，最适合制造大中型样件，但成形样件必须经过后续处理，同时样件本身不能有复杂内腔，其加工产品如图 3-32、图 3-33 所示。美国福特汽车公司用 LOM 法制造长为 685mm 的汽车曲轴模样，先分 3 块做，然后再拼装成砂型铸造用的模板，尺寸精度达到 ±0.13mm。

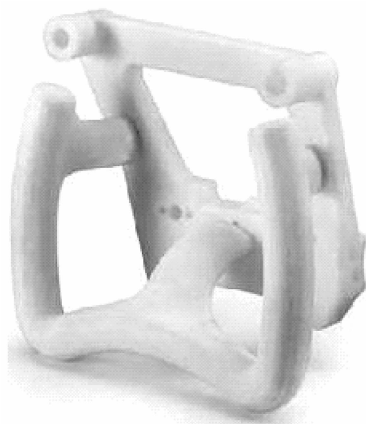


图 3-32　LOM 产品（一）

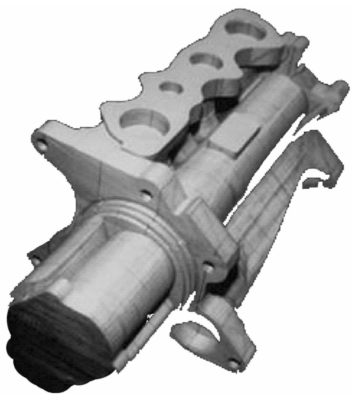


图 3-33　LOM 产品（二）

## 3.6.3　激光快速成形的关键技术

### 1. 几何模型的建立

几何模型可以用线框模型、曲面模型或实体模型来建立。形体较复杂的零件除 Pro/Engineer 外，其他软件很难直接将零件用实体模型描述出来。在 Pro/Engineer 中，通常是用曲面造型方法先构造曲面，再加入一个厚度特征，即可得到一个薄壁实体；在 EUCLID 中，先用曲面造型方法构造曲面后，再将曲面法向偏置一个料厚，然后将两个曲面的边界用一个直纹面“缝合”起来，即可构成一个实体模型。

### 2. STL 文件的生成

STL 文件格式是美国 3D 公司最先提出的一种模型数据表示格式，目前已作为 CAD 的几何模型与分层软件之间数据交换的标准格式，STL 文件是通过软件的 SLA 接口，将几何三角形的边长由精度决定模型进行表面三角化处理，即将模型完全使用表面三角形方式表示出来。该模型的数据表示是首先给出法向量的三个分量，接着给出三角形的三个顶点坐标，将模型由若干个三角形表示出来，经过表面三角形化的模型格式，称为“STL 文件”。

### 3. 零件的分层

分层软件是以 STL 文件为基础。分层软件首先读出 STL 文件，然后转化成自身所需要的格式。使表面三角形模型与平面求交，得到平面内的交线，经过数据处理，加入工艺参数，供下一步用。一般先求出模型 $z$ 轴的最大、最小值，然后按一定的间隙

对模型用一组平行于 $XOY$ 平面进行剖切，求出每个平面的扫描轨迹。图 3-34 为 STL 转换成切层的示意图。

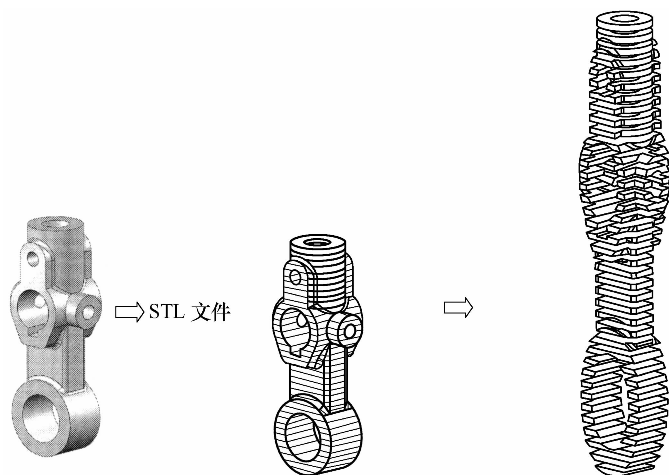



图 3-34　STL 转换成切层

**4. 加工参数的确定**

在激光快速成形过程中，要根据光敏树脂的特性及加工要求设置参数。激光的强度和光照时间直接影响固化深度；激光束的粗细直接影响加工精度。此外，扫描间距的大小对原型的强度有直接影响。原型的强度与层内强度和层间强度有关，而层内强度和层间强度又取决于光束直径的大小、光点的距离、分层间距及层内加工方式。层内加工方式选择的好坏，影响加工速度、固化率及零件质量。

**5. 加工**

参数设定好后，计算机用加工驱动软件将每层需要加工的平面图形转化与数控机床走刀轨迹相似的代码，或者转化成绘图机图形协议的绘图代码，用这些代码控制激光头进行扫描。原型制作完毕后，经抛光、涂漆等处理，即可直接制作装配检验模型。

## 3.6.4　激光快速成形技术的应用

激光快速成形技术以其快速性和高精度为制造领域带来革命性的创新，为制造业的发展提供了新的技术支持。随着快速成形技术与快速反求、快速模具制造等技术相结合，激光快速成形技术也越来越多地用于机械、电子、汽车制造、航空航天、工艺美术、医疗康复等方面，并产生了极大的社会经济效益。快速成形技术的应用主要体现在以下几个方面。

**1. 新产品开发过程中的设计验证与功能验证**

RP 技术可快速地将产品设计的 CAD 模型转换成物理实物模型，这样可以方便地验证设计人员的设计思想和产品结构的合理性、可装配性、美观性，发现设计中的问题可及时修改。如果用传统方法，需要完成绘图、工艺设计、工装模具制造等多个环节，周期长、费用高。如果不进行设计验证而直接投产，则一旦存在设计失误，将会

造成极大的损失。图 3-35 所示为激光快速成形的某缸盖。

**2. 可制造性及可装配性检验**

对诸如汽车、卫星、导弹等有限空间的复杂系统的可制造性和可装配性，可以用快速成形方法进行检验和设计，将大大降低此类系统的设计制造难度。对于难以确定的复杂零件，可以用快速成形技术进行试生产以确定最佳的合理的工艺。

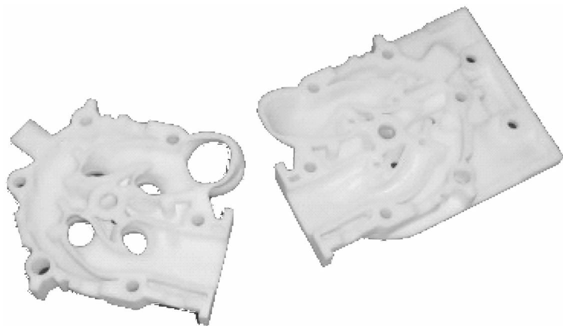


图 3-35　某缸盖的激光快速成形产品图

**3. 单件、小批量和特殊复杂零件的直接生产**

对于高分子材料的零部件，可用高强度的工程塑料直接快速成形，满足使用要求；对于复杂金属零件，可通过快速铸造或直接金属件成形获得。该项应用对航天航空及国防工业有着特殊意义。

**4. 快速模具制造**

通过各种转换技术将 RP 原型转换成各种快速模具，如低熔点合金模、硅胶模、金属冷喷模、陶瓷模等，进行中小批量零件的生产，满足产品更新换代快、批量越来越小的发展趋势。快速成形与铸造相结合的产物是快速铸造技术（Quick Casting，QC）。这种快速铸造使得多种材料、任何形状复杂、内部结构精细的铸件都能生产出来，产品开发周期短、精度高，大大地提高了企业获取订单的竞争力。RP 为实现铸造的短周期、多品种、低成本、高精度提供了一个快速响应技术，显示出了强大的生命力和巨大的应用潜力。快速成形技术在铸造上的应用如图 3-36 所示。

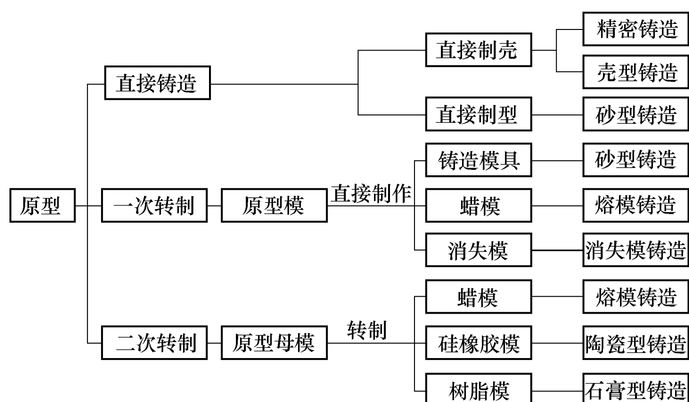



图 3-36　快速成形技术在铸造上的应用

其中直接铸造法主要是指由 RP 技术直接一步成形铸造用的型壳、型芯。型壳、型芯经处理后，即可进行金属浇注，铸造出金属零件。

直接壳型铸造是利用激光选择性烧结对以反应性树脂包覆的陶瓷粉进行烧结，可

以一步制成铸造用的型壳、型芯的方法。在 CAD 环境中，直接将零件模样转换为壳型，再配以浇注系统。型壳的厚度可取 5 ~ 10mm。烧结过程中，非零件部分进行烧结，零件部分仍是粉末。烧结完成后将粉末倒出，再经固化处理就获得铸造用的型壳，进行浇注后即可制得金属零件。

直接制模铸造成形方法不是采用激光进行选择性烧结，而是采用粘结剂进行选择性粘接。把 CAD 模型转换成模壳，然后以类似于熔模铸造的工艺，制造出金属零件。从设计到成品零件出厂前后只需 10 天，是金属零件设计和制造上的一个突破。

## 3.7　激光再制造技术

近年来，国际上诞生了一门新兴技术——再制造技术（Remanufacturing Technology）。与传统修复技术不同，激光再制造技术是一种全新概念的先进修复技术，其技术基础是激光熔敷技术。激光熔敷原本是一种表面强化技术，不涉及零件精确成形问题。但以激光熔敷为修复技术平台，加上现代先进制造、快速原形等技术理念，则发展成为激光再制造技术。它集先进高能束技术、先进数控和计算机技术、CAD/CAM 技术、先进材料技术、光电检测控制技术为一体，不仅能使损坏的零件恢复原有或近形尺寸，而且性能达到或超过原基材水平。由此形成了一门新的光机电、计算机、自动化、材料综合交叉的先进制造技术。

### 3.7.1　激光再制造技术的主要种类

1）激光熔覆与合金化。激光熔覆技术是采用激光束在选定工件表面熔覆一层特殊性能的材料，以改善工件表面性能的工艺。

2）激光淬火与毛化。激光淬火技术是利用聚焦后的激光束入射到钢铁材料表面，使其温度迅速升高到相变点以上，当激光移开后，由于仍处于低温的内层材料的快速导热作用，使受热表层快速冷却到马氏体相变点以下，进而实现工件的表面相变硬化。大型轧辊表面激光熔凝淬火的最大淬硬层深度可达 2mm 以上。

3）激光焊接。激光焊接原理是将高强度的激光辐射至金属表面，通过激光与金属的相互作用，使金属熔化形成焊接。

### 3.7.2　激光再制造系统的构成

激光再制造系统由激光器、光学系统、送粉器和红外温度监控系统等组成。激光器可采用 1 ~ 5kW 的 $CO_2$ 激光器或 0.4 ~ 2kW Nd-YAG 激光器，多模即可。光学系统采用聚焦光束和宽带光束两种方法，宽带光束可使熔敷表面光滑平整，而且没有裂纹等产生。送粉器采用载气式或非载气式输送两种均可，非载气式送粉的粉末利用率高达 90%，载气式的仅为 30% ~ 40%。在进行二维以下运动修复时，采用非载气式送粉可节省粉末，从而降低使用成本。从光束与粉嘴相互运动关系来看，可分为一维、二维及三维修复。红外温度监控系统用于监测熔池温度，在激光熔敷修复过程中，由于多层叠加，熔层表面温度会随高度增加而增加，在尖角处也会引起热量陡增。必须对熔

池温度进行实时监测，并将测温结果反馈给激光器和数控机床，控制激光器功率输出及 CNC 机床的运动速度，以保持熔池温度稳定。

图 3-37 为三维数字化激光熔敷机器人工作站系统的总体方案图。系统工作时，利用激光扫描仪对物体进行扫描，得到目标物体的三维模型；利用三维模型生成机器人的修复运动轨迹；利用机器人携带激光器完成修复工作；修复之前利用系统软件进行运动仿真，修复过程中借助于人机界面对激光器和送粉器的通断和强弱进行调节；同时系统软件监控运行状态，对出现的意外情况进行报警。

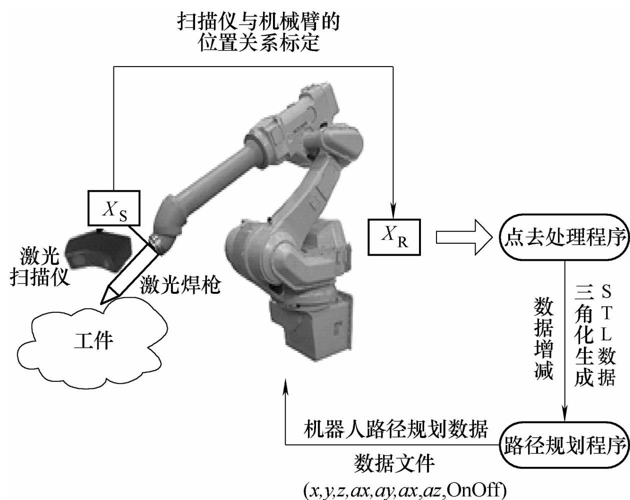



图 3-37　三维数字化激光熔敷机器人工作站系统总体方案

针对工业生产领域中大型装备工件局部破损的修复再生，某单位开发的三维数字化激光熔敷机器人工作站（见图 3-38），可满足高精度、高灵活、可移动的修复任务需求，用来完成大型工件破损部位的在线修复。三维数字化激光熔敷机器人工作站包括工控机、机器人及其控制器、激光三维扫描仪及视频采集卡、激光枪及其控制器、金属粉送粉器及其控制器等几个主要组成部分，将机器人控制技术、三维模型重构技术和激光熔敷技术有机结合。

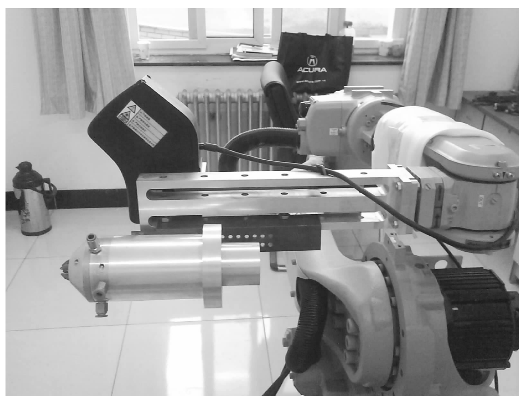



图 3-38　三维数字化激光熔敷机器人工作站

## 3.7.3　激光熔覆工艺方法

激光熔覆技术是一种材料表面改性的方法，它以不同的添料方式在被熔覆基体表面上放置被选择的涂层材料，经激光幅照使之和基体表面一薄层同时熔化，并快速凝

固后形成稀释度极低、与基体成冶金结合的表面涂层，可以获得一般平衡状态下难以获得的优异组织性能，显著改善基层表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化及电气特性，从而达到表面改性或修复的目的。它对于基材的要求无任何限制，可根据使用性能要求设计涂层的成分组成，在较为廉价的材料上制备出性能优异且具有高结合强度的表层，这是其他表面处理工艺所无法比拟的。与堆焊、喷涂、电镀和气相沉积相比，激光熔覆具有稀释度小、组织致密、涂层与基体结合好、适合熔覆材料多、粒度及含量变化大等特点。

**1. 熔覆材料**

常用激光熔覆材料主要包括镍基、铁基、钴基、铜基自熔合金，以及上述合金与碳化物（WC、TiC、SiC 等）颗粒组成的金属陶瓷复合粉末，以及 $Al_2O_3$、$ZrO_2$ 等陶瓷材料等。适用的工件基材包括钢铁、铝合金、铜合金、镍合金和钛合金等。

**2. 熔覆工艺的类型**

激光熔覆按熔覆材料的供给方式大概可分为两大类，即预置式激光熔覆和同步式激光熔覆。

预置式激光熔覆是将熔覆材料预先置于基材表面的熔覆部位，然后采用激光束辐照扫描熔化，熔覆材料以粉、丝、板的形式加入，其中以粉末的形式最为常用。预置式激光熔覆的主要工艺流程为：基材熔覆表面预处理→预置熔覆材料→预热→激光熔化→后热处理。

同步式激光熔覆则是将熔覆材料直接送入激光束中，使供料和熔覆同时完成。熔覆材料主要也是以粉末的形式送入，有的也采用线材或板材进行同步送料。同步式激光熔覆的主要工艺流程为：基材熔覆表面预处理→送料激光熔化→后热处理。

按工艺流程，与激光熔覆相关的工艺主要是基材表面预处理方法、熔覆材料的供料方法、预热和后热处理。

**3. 激光熔覆成套设备**

激光熔覆成套设备由激光器、冷却机组、送粉机构、加工工作台等组成。激光器的选用 $CO_2$ 激光器或固体激光器。

**4. 激光熔覆工艺方法和工艺流程**

1）合金同步法。是指采用专门的送料系统在激光熔覆的过程中将合金材料直接送进激光作用区，在激光的作用下基材和合金同时熔化，然后冷却结晶，形成合金熔覆层。该方法的工艺过程简单，合金材料利用率高，可控性好，易于实现自动化，实际生产中较多采用。其工艺流程为：基材表面预处理→预热→送料激光熔化→后热处理。

2）合金前置法。是指将待熔覆的合金材料以一定方法预先覆盖在材料表面，然后采用激光束在合金覆盖层表面扫描，使整个合金覆盖层及一部分基材熔化，激光束离开后熔化的金属快速凝固，而在基材表面形成以冶金结合的合金熔覆层。其工艺流程为：基材表面预处理→预置熔覆材料→预热→激光熔化→后热处理。

**5. 熔覆工艺参数**

熔覆的工艺参数主要有：激光功率、扫描速度、光斑面积、送粉量等。

**6. 轴类零件的激光熔覆修复工艺**

1）预处理工序。包括工件表面除油、除锈，喷砂清理（进一步清理），熔覆前处理（将需要激光熔覆的区域清洗干净，将存在明显缺陷的区域整平）。

2）质量检验工序。采用磁粉探伤、X 射线探伤、荧光探伤或显示剂探伤法对清洗干净的表面进行探伤，确定有无明显的缺陷区域存在。

3）激光熔覆。采用合金粉末进行激光熔覆，不需要预热，不产生冶金裂纹，硬度最高可以达到 63HRC。

4）后续加工处理。包括激光熔覆区域的抛磨修整与后处理，必要时喷耐磨涂层。

5）质量检验与验收。检验方法同修复步骤 2，确认激光熔覆处理后零件表面无各种缺陷，即可进行验收。

经过上述处理工序，可以将轴类零件复旧如新。

**7. 大型齿轮的激光淬火与修复工艺**

1）工艺流程。将大型齿轮装夹到激光加工机床上，清洗齿轮齿面的油污和锈斑，在需要激光加工的齿面及轴颈部分喷涂吸光涂料，再用激光加工程序对齿面（齿顶、齿根等）进行淬火处理。

2）淬火工艺参数。激光淬火后齿面的硬度范围可以控制在 35～45HRC 之间，淬硬层深度为 0.4～0.6mm，激光功率 2.0～3.5kW，淬火扫描速度为 10～50mm/s。根据齿轮齿面、齿根和齿顶对材料表面的不同硬度要求，采用数控系统分段分区改变工艺参数，获得相应的激光淬硬层。激光淬火后不用回火处理，齿面的表面粗糙度基本不变。

3）激光熔覆工艺指标。激光熔覆的单层厚度根据需要可以在 0.2～2.5mm 之间调节。激光熔覆层的硬度可以根据工件的需求在 25～60HRC 之间调节。对于大型钢齿轮，在无预热条件下可直接熔覆，熔覆层均匀、连续，无裂纹、气孔等冶金缺陷。

**8. 涡轮叶片的激光熔覆与修复工艺**

1）预处理工序。基本工序同前。

2）需要补焊的缺陷检测。通过肉眼观察和实验仪器检测，探测需要进行修复的区域，包括磨损区域、裂纹区域等，并记录所需要修复的位置。

3）激光熔覆。对于叶片中的微细裂纹，如果采用脉冲 YAG 激光进行修复，可以获得更加理想的效果。激光修复叶片分为两类，一类是显微裂纹的修补，另一类是磨损叶片顶端的接长。采用脉冲激光熔覆技术，通过控制激光输入的能量、重复频率数和激光扫描速度，可以控制激光熔覆层不产生裂纹。采用 $CO_2$ 激光进行熔覆处理，可以获得很好的效果。

4）后续加工。对修复的叶片进行研磨、抛光修整，使外观尺寸达到图样要求。

5）质量检测。对修复好的涡轮盘进行质量检测，确认所有修复部位质量达到要求。

6）精整处理。对检验后的涡轮盘进行表面喷涂涂层等精整处理。

**9. 修复应用实例**

激光熔覆主要应用于两个方面，一是对材料的表面改性，如燃气轮机叶片，轧辊，

齿轮等；二是对产品的表面修复，如转子，模具等。有关资料表明，修复后的部件强度可达到原强度的 90% 以上，其修复费用不到重置费用的 1/5，可缩短维修时间，解决了大型企业重大成套设备连续可靠运行所必须解决的转动部件快速抢修难题。另外，对关键部件表面通过激光熔覆超耐磨抗蚀合金，可以在零部件表面不变形的情况下大大提高零部件的使用寿命。对模具表面进行激光熔覆处理，不仅提高模具强度，还可以使制造成本降低 2/3，制造周期缩短 4/5。

热锻模一般采用 5CrNiMo 或 5CrMnMo 合金工具钢制造，锻模在高温和一定载荷条件下工作，工况条件恶劣，要求模具表面需具有良好的高温强度、耐热疲劳性能及耐磨性能，而采用激光熔覆表面处理技术可以实现上述要求。根据热锻模的实际工作情况，确定热锻模的表面涂覆材料为碳化物复合粉末 $NiCrAl/Cr_3C_2$，工艺方法为合金同步法。具体工艺操作过程如下：

1） 基材熔覆表面预处理。将基材表面加热到 300 ~ 450℃ 去油，或者用有机清洗剂去油。用喷砂处理去除基材表面的锈蚀，并使其粗毛化，利于粉末的附着。

2） 预热。在火炉内加热，使基材表面加热到一定的温度，适当减少基材与熔覆层之间的温差以减小熔覆层冷缩产生的应力。

3） 同步送粉激光熔化。为保证熔覆质量，正确选择激光功率、扫描速度、光斑直径和送粉量，以保证激光光斑内的光功率密度分布均匀，使粉末流的形状与光斑的形状和尺寸相匹配，严格控制粉末流与基材、激光束三者间的相对位置。一般功率密度为 $10^3 \sim 10^8 W/cm^2$ 时，熔覆过程在 0.1 ~ 1s 内完成。

4） 后热处理。采用炉内加热保温，充分后随炉冷却，以消除熔覆层的残余应力。

5） 机械加工。进行机械加工并检查表面处理质量。

## 3.7.4　激光再制造技术的工业应用

（1）轧辊的修复与强化　钢铁冶金设备中的大型轧辊是高附加值的零件，激光加工的费用均在原值的 25% 以下，而且激光加工的周期短，可以大大节约维修的时间，从而保证了及时生产，并且性能如同新件。激光堆焊修复各种轧辊，其中以小型轧辊和局部修复更为擅长。在实际使用中，堆焊修复后的辊 1 次使用期均达到 1 年以上，比未堆焊的 60SiMnMo 锻钢辊平均使用期（3 个月）提高 3 倍以上。在 1 次使用后，基材未受损伤的情况下（进行探伤检测），仍可进行再次堆焊修复。多数情况都进行 3 ~ 4 次修复。图 3-39 为拉矫辊修复对比图，图 3-40 为激光堆焊恢复轧辊轴头的尺寸。采用激光熔覆技术对大型转子与轮盘进行修复，不需要预热工件，就可以恢复轴颈的尺寸，而且后续加工量小，不产生冶金裂纹，硬度可以达到 60HRC 以上。图 3-41 所示

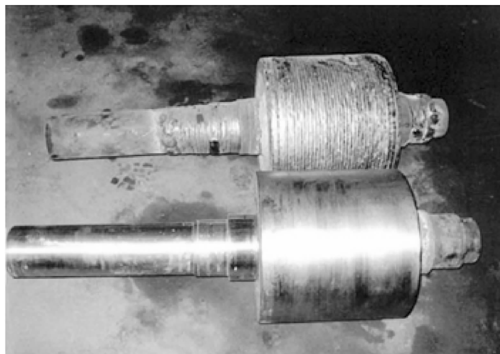


图 3-39　拉矫辊修复对比图

为修复实例。

（2）各种轴类零件磨损、抱瓦、裂纹的修复　各种轴类零件经激光堆焊处理后堆焊层无粗大的铸造组织，堆焊层及界面组织细密、晶粒细化、无孔、砂眼、夹杂、裂纹等缺陷，性能如同新件。

（3）各种高附加值的大、中、小型齿轮类零件的修复与强化　激光堆焊技术可使这些零件性能得到恢复。图 3-42 为采用激光强化齿轮的内表面的加工情景。

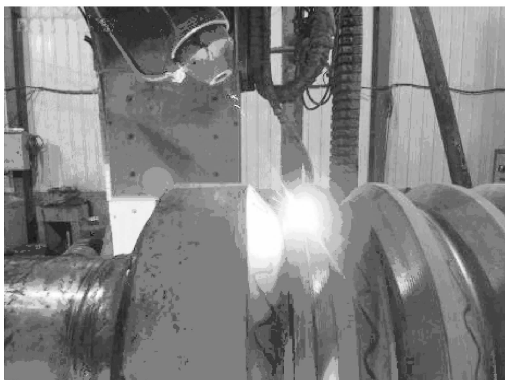
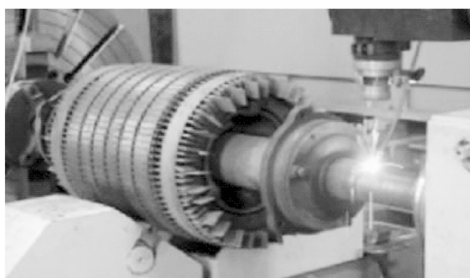


图 3-40　激光堆焊恢复冶金轧辊轴头的尺寸



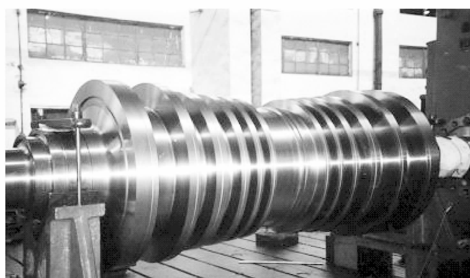


图 3-41　大型转轮的激光熔覆恢复轴颈尺寸

（4）激光淬火技术可对各种导轨、大型齿轮、轴颈、汽缸内壁、模具、减振器、摩擦轮、轧辊、滚轮零件进行表面强化。汽车模具镀膜和淬火模具的表面处理，通过表面涂覆、表面改性或复合处理技术，来改变模具表面的形态、化学成分、组织结构和应力状态，获得所需的表面性能。

（5）高压高速风机叶片的修复　叶片因其工作环境较为恶劣，叶轮叶片进风口部位易严重腐蚀与磨损，一般使用 3000 ~ 4000h 即因叶轮叶片腐蚀与磨损失去平衡而报废。采用激光堆焊技术可以使修复层与原基材为冶金结合，硬度达到 55HRC 左右。服役性能如同新件。例如，英国 P. R 航空发动机公司将它用于涡轮发动机叶片的修复，美国海军试验室用于修复舰船螺旋桨叶。



图 3-42　激光强化齿轮内表面

## 3.8　特种加工技术

特种加工（Non-traolitional Machining）是将电、磁、声、光等物理能量及化学能量或其组合直接施加在工件被加工的部位上，从而使材料去除、累加、变形或改变性能的加工方法。特别适合于难加工材料的加工及复杂形面、薄壁、小孔、窄缝等特殊工件的加工。

特种加工方法特点如下。

1）特种加工主要不是依靠机械能，而是利用其他能量（如电能、光能、声能、热能、化学能等）去除材料。

2）特种加工方法由于工具不受显著切削力的作用，对工具和工件的强度、硬度和刚度均没有严格要求。

3）一般不会产生加工硬化现象。且工件加工部位变形小、发热少，或发热仅局限于工件表层加工部位很小区域内，工件热变形小，加工应力也小，易于获得良好的加工质量。

4）加工中能量易于转换和控制，有利于保证加工精度和提高加工效率。

5）特种加工方法的材料去除速度，一般低于常规加工方法，这也是目前常规加工方法仍占主导地位的主要原因。

一般按能量来源和作用原理进行分类，特种加工的方法如下：

1）电、热能——电火花加工、电火花线切割加工、电子束加工、等离子体加工。

2）电、机械能——离子束加工。

3）电、化学能——电解加工、电铸加工、涂镀加工。

4）电化学、机械能——电解磨削、电解研磨。

5）声、机械能——超声加工。

6）光、热能——激光加工。

7）化学能——化学加工。

8）液流、机械能——挤压研磨、水射流切割。

常用的特种加工方法分类见表 3-5。

**表 3-5　常用特种加工方法分类**

| 特种加工方法 | | 能量来源及形式 | 作用原理 | 英文缩写 |
|---|---|---|---|---|
| 电火花加工 | 电火花成形加工 | 电能、热能 | 熔化、汽化 | EDM |
| | 电火花线切割加工 | 电能、热能 | 熔化、汽化 | WEDM |
| 电化学加工 | 电解加工 | 电化学能 | 金属离子阳极溶解 | ECM（ELM） |
| | 电解磨削 | 电化学、机械能 | 阳极溶解、磨削 | EGM（ECG） |
| | 电解研磨 | 电化学、机械能 | 阳极溶解、研磨 | ECH |
| | 电铸 | 电化学能 | 金属离子阴极沉积 | EFM |
| | 涂镀 | 电化学能 | 金属离子阴极沉积 | EPM |

（续）

| 特种加工方法 | | 能量来源及形式 | 作用原理 | 英文缩写 |
|---|---|---|---|---|
| 激光加工 | 激光切割、打孔 | 光能、热能 | 熔化、汽化 | LBM |
| | 激光打标记 | 光能、热能 | 熔化、汽化 | LBM |
| | 激光处理、表面改性 | 光能、热能 | 熔化、相变 | LBT |
| 电子束加工 | 切割、打孔、焊接 | 电能、热能 | 熔化、汽化 | EBM |
| 离子束加工 | 蚀刻、镀覆、注入 | 电能、动能 | 原子撞击 | IBM |
| 等离子弧加工 | 切割（喷镀） | 电能、热能 | 熔化、汽化（涂覆） | PAM |
| 超声加工 | 切割、打孔、雕刻 | 声能、机械能 | 磨料高频撞击 | USM |
| 化学加工 | 化学铣削 | 化学能 | 腐蚀 | CHM |
| | 化学抛光 | 化学能 | 腐蚀 | CHP |
| | 光刻 | 光、化学能 | 光化学腐蚀 | PCM |

## 3.8.1　电子束加工

随着微米加工技术的发展，特别是在微电子学领域，越来越小的元器件需求日益增长。例如，很多元器件要求制造 10～20μm 的小孔和窄缝，其边缘清晰度为几 μm，一般的加工方法是很难实现的，而电子束加工可以实现。

### 1. 加工原理

电子束（Electron Beam）加工是在真空条件下，利用聚焦后能量密度极高（$10^6$～$10^9$W/$cm^2$）的电子束，以极高的速度（光速的 1/2～1/3）冲击到工件表面极小的面积上，在几分之一 μs 的时间内，其能量的大部分转变为热能，使被冲击部分的工件材料瞬时达到几千℃以上的高温，热量来不及传导扩散，从而引起材料的局部熔化和汽化。电子束加工的加工原理如图 3-43 所示。

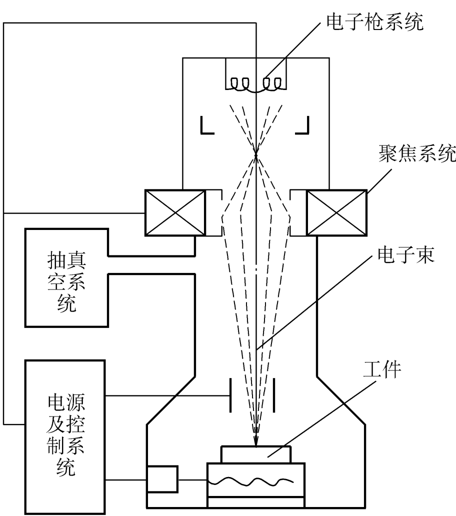



图 3-43　电子束加工的加工原理

### 2. 电子束加工工艺

利用电子束的热效应可以对材料进行表面热处理、焊接、刻蚀、钻孔、熔炼，或直接使材料升华。控制电子束能量密度的大小和能量注入时间，就可达到不同的加工目的。如只使材料局部加热就可进行电子束热处理；使材料局部熔化就可进行电子束焊接；提高电子束能量密度，使材料熔化和汽化，就可进行打孔、切割等加工；利用较低能量密度的电子束轰击高分子材料时产生化学变化的原理，即可进行电子束光刻加工。图 3-44 给出了各种电子束加工的功率密度和作用时间。

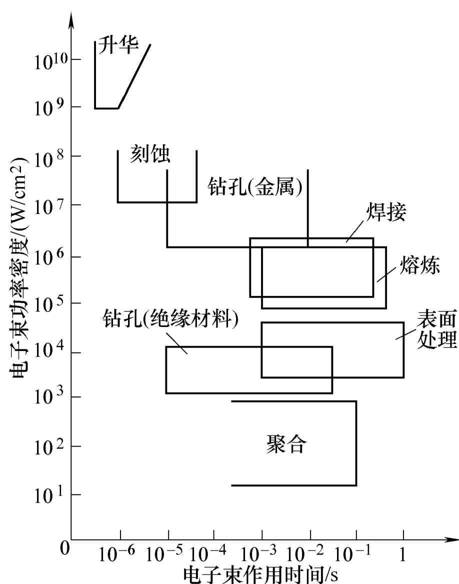



图 3-44　各种电子束加工的功率密度和作用时间

（1）电子束焊接　电子束功率密度达 $10^5 \sim 10^6 \mathrm{W/cm^2}$ 时，电子束轰击处的材料即局部熔化；当电子束相对工件移动，熔化的金属即不断固化，利用这个现象可以进行材料的焊接。电子束焊具有深熔的特点，焊缝的深宽比可达 20∶1，甚至 50∶1。这是因为当电子束功率密度较大时，电子束给予焊接区的功率远大于从焊接区导走的功率。利用电子束焊接的这一特点可实现多种特殊焊接方式。电子束几乎可以焊接任何材料，包括难熔金属（W、Mo、Ta、Nb）、活泼金属（Be、Ti、Zr、U）、超合金和陶瓷等。此外，电子束焊接的焊缝位置精确可控、焊接质量高、速度快，在航空、火箭、电子、汽车等工业中可用作精密焊接。在重工业中，电子束焊接的功率已达 100kW，可平焊厚度为 200mm 的不锈钢板。对大工件焊接时须采用大体积真空室，或在焊接处形成可移动的局部真空。

（2）电子束刻蚀和电子束钻孔　用聚焦方法得到很细的、功率密度为 $10^6 \sim 10^8 \mathrm{W/cm^2}$ 的电子束，周期地轰击材料表面的固定点，适当控制电子束轰击时间和休止时间的比例，可使被轰击处的材料迅速蒸发而避免周围材料的熔化，这样就可以实现电子束刻蚀、钻孔或切割。同电子束焊接相比，电子束刻蚀、钻孔、切割所用的电子束功率密度更大而作用时间较短。电子束可在厚度为 0.1 ~ 6mm 的任何材料的薄片上钻直径为 1 至几百微米的孔，能获得很大的深度/孔径比。例如，在厚度为 0.3mm 的宝石轴承上钻直径为 25μm 的孔。电子束还适合在薄片（如燃气轮机叶片）上高速大量地钻孔。

（3）电子束熔炼　电子束加热可使材料在真空中维持熔化状态并保持很长时间，实现材料的去气和杂质的选择性蒸发，可用来制备高纯材料。电子束加热是电能转为热能的有效方式之一，大约有 50% 功率用于熔化和维持液态。功率在 60kW 以下的电子束熔炼机可用直热式钨丝作为电子枪的阴极。60kW 以上的熔炼机的电子枪则用间热式块状钽阴极，它由背后的钨丝所发射的电子轰击加热到 2700K，可有每平方厘米为几安的发射电流密度。电子枪加速电压约 30kV，这样容易防止电击穿和减弱 X 射线辐射。电子束用磁聚焦和磁偏转。电子枪和熔炼室用不同的真空泵抽气，真空度分别维持在 $10^{-3}$Pa 和 $10^{-1}$Pa 左右。

**3. 电子束加工特点**

1）电子束能聚焦成很小的斑点（直径一般为 0.01 ~ 0.05mm），适合于加工微小的圆孔、异形孔或槽，可用于薄材料的穿孔和切割。穿孔直径一般为 0.03 ~ 1.0mm，最小孔径可达 0.002mm。切割 0.2mm 厚的硅片，切缝仅为 0.04mm，因此可节省材料。

2）功率密度高，能加工高熔点和难加工材料，如钨、钼、不锈钢、金刚石、蓝宝石、水晶、玻璃、陶瓷和半导体材料等。

3）无机械接触作用，无工具损耗问题。

4）加工速度快，例如，在 0.1mm 厚的不锈钢板上穿微小孔，每秒可达 3000 个；切割 1mm 厚的钢板速度可达 240mm/min。

5）由于使用高电压，会产生较强 X 射线，必须采取相应的安全措施。

6）需要在真空装置中进行加工。

## 3.8.2　离子束加工

离子束加工是在真空条件下利用离子源（离子枪）产生的离子经加速聚焦形成高能的离子束流投射到工件表面，使材料变形、破坏、分离以达到加工目的。

因为离子带正电荷且质量是电子的千万倍，并且加速到较高速度时，具有比电子束大得多的撞击动能，因此，离子束撞击工件将引起变形、分离、破坏等机械作用，而不像电子束是通过热效应进行加工。

### 1. 加工原理

离子束加工是将惰性气体（Ar、Kr、Xe等）的离子用电能加速，用电子束的能量进行加工的方法。其中最典型的是离子溅射去除加工，它是用电火花使惰性气体在低真空的离子枪室中等离子化，将离子加速成束状，用静电透镜聚焦后轰击工件，从表面上击出原子、分子的方法。离子束加工原理如图 3-45 所示。

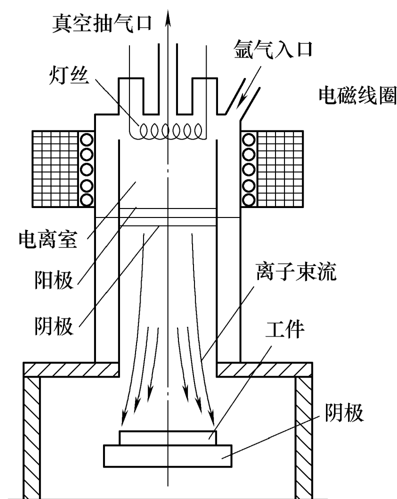



图 3-45　离子束加工原理图

### 2. 加工方式

离子束加工方式包括离子蚀刻、离子镀膜及离子溅射沉积和离子注入等。

1）离子刻蚀。离子刻蚀是在真空中用能量为 0.1～5keV 的氩离子轰击工件，将其表面的原子剥离。这是一种原子尺度的“切削”加工，加工原理如图 3-46 所示。利用离子刻蚀对工件进行切割和钻孔，可加工表面图形。与化学刻蚀相比，用离子刻蚀法所得的线条清晰均匀，侧壁陡直，可制得线宽为微米或亚微米级的图形。而且重复性好，易于控制。该种技术可用来制造大规模或超大规模集成电路，也可用于精密机械制造。离子刻蚀可用于加工空气轴承的沟槽，打孔，加工极薄材料及超高精度非球面透镜，还可用于刻蚀集成电路等的高精度图形。

这种加工本质上属于一种原子尺度的切削加工，通常又称为离子铣削。

2）离子溅射沉积。采用能量为 0.1～5keV 的氩离子轰击某种材料制成的靶材，将靶材原子击出并令其沉积到工件表面上并形成一层薄膜，加工原理如图 3-47 所示。实际上此法为一种镀膜工艺。

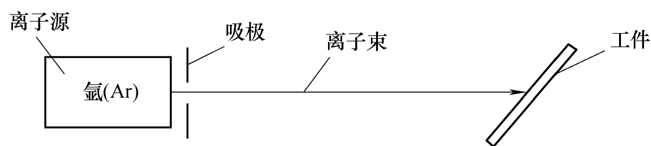



图 3-46　离子刻蚀加工

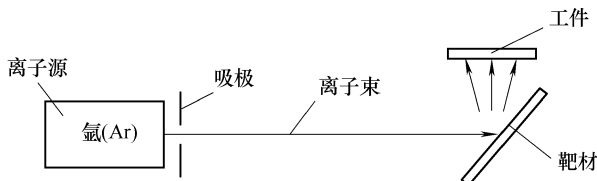



图 3-47　离子溅射沉积加工

3）离子镀膜。离子镀膜一方面是将靶材射出的原子向工件表面沉积，另一方面还有高速中性粒子打击工件表面以增强镀层与基材之间的结合力（可达 10 ~ 20MPa），加工原理如图 3-48 所示。

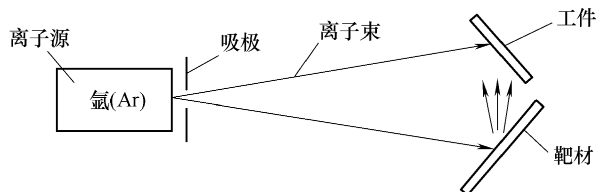



图 3-48　离子镀膜

此法适应性强，膜层均匀致密、韧性好、沉积速度快，目前已获得广泛应用。

4）离子注入。离子注入是指在真空室中，将具有一定能量的所需元素的离子，注入到工件表面层中，达到改善表面性能的工艺方法。离子注入能增加材料表面硬度，降低摩擦系数，改善耐磨性、抗氧化性、抗腐蚀性、耐疲劳性，以及某些材料的超导性能、催化性能和光学性能。加工原理如图 3-49 所示。

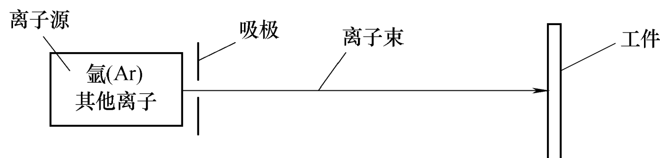



图 3-49　离子注入

此法不受温度及注入何种元素及粒量限制，可根据不同需求注入不同离子（如磷、氮、碳等）。注入表面元素的均匀性好，纯度高，其注入的粒量及深度可控制，但设备费用大、成本高、生产率较低。

**3. 离子束加工特点**

1）加工精度高。离子束利用微观力效应进行加工，被加工表面层不产生热量，不会引起机械应力和机械损伤。离子束加工的去除精度可达纳米级。

2）在较高真空度下进行加工，环境污染少。特别适合加工高纯度的半导体材料及易氧化的金属材料。

3）加工应力小，变形极微小，加工表面质量高，适合于各种材料和低刚度零件的加工。

4）可加工材料范围广泛。由于离子束加工是利用力效应原理，因此对脆性材料、半导体材料、高分子材料等均可加工。

5）加工方法丰富。离子束加工可实现去除、镀膜注入、曝光等多种类型的加工。

6）离子束加工控制性能好，应用范围广，易于实现自动化。

## 3.8.3　电火花加工

### 1. 工作原理

电火花加工（Electrical Discharge Machining，EDM）利用工具电极与工件电极之间脉冲性火花放电，产生瞬时高温，工件材料被熔化和汽化。同时，该处绝缘液体也被局部加热，急速汽化，体积发生膨胀，随之产生很高的压力。在这种高压作用下，已经熔化、汽化的材料就迅速从工件的表面去除。电火花加工原理如图 3-50 所示。

### 2. 电火花加工类型

1）电火花成形加工。适用于各种孔加工、模具型腔加工，还可刻字、表面强化、涂覆等。

2）电火花线切割加工。用连续移动的钼丝（或铜丝）作工具阴极，工件为阳极。机床工作台带动工件在水平面内作两个方向的移动，可切割出二维图形（见图 3-51）。同时，丝架可作小角度摆动，可切割出斜面。适用于各种冲模、粉末冶金模及工件，各种样板、磁钢及硅钢片的冲片，钼、钨、半导体或贵重金属。

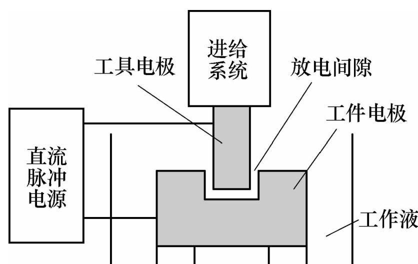



图 3-50　电火花加工原理图

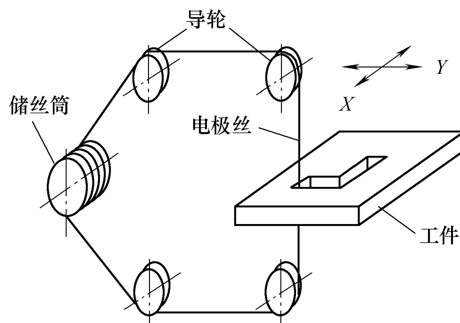



图 3-51　电火花线切割原理图

### 3. 电火花加工特点

1）不受加工材料硬度限制，可加工任何硬、脆、韧、软的导电材料。

2）加工时无显著切削力，发热小，适于加工小孔、薄壁、窄槽、型面、型腔及曲线孔等，且加工质量较好。

3）脉冲参数调整方便，可一次装夹完成粗、精加工。

4）易于实现数控加工。

### 3.8.4　电解加工

**1. 工作原理**

利用金属在电解液中的电化学反应（阳极溶解）将工件加工成形。工作时，工件接阳极，工具（铜或不锈钢）接阴极，两极间加直流电压（6～24V），两极间保持 0.1～1mm 间隙。在间隙处通以 6～60m/s 高速流动电解液，形成极间导电通路，工件表面材料不断溶解，溶解物及时被电解液冲走。工具阴极不断进给，保持极间间隙。电解加工原理如图 3-52 所示。

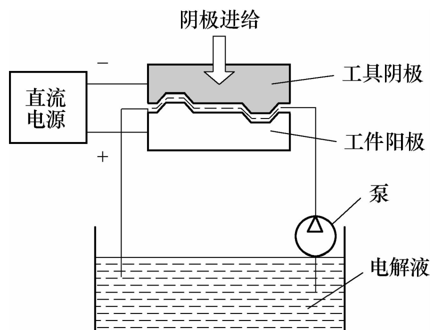



图 3-52　电解加工原理图

**2. 电解加工特点**

1）不受材料硬度的限制，能加工任何高硬度、高韧性的金属材料，并能以简单的进给运动一次加工出形状复杂的型面和型腔。

2）加工型面、型腔生产率高（比电火花加工高 5～10 倍）。采用振动进给和脉冲电流等新技术，可进一步提高生产效率和加工精度。

3）阴极在加工中损耗小，可长期使用。

4）加工表面质量好，无毛刺、变形层和残余应力。

5）可加工叶片、锻模等复杂型面，以及易变形或薄壁零件。

6）加工精度（±0.03mm）及稳定性不易提高。

7）小孔、窄缝及棱角清晰零件难加工。

8）电极设计制造较麻烦，需多次修整。

9）设备投资大，有污染，需防护。

**3. 电解加工应用**

（1）深孔扩孔加工　固定式阴极深孔扩孔的加工原理如图 3-53 所示。其加工特点是设备简单，操作方便，生产率高，但电源功率较大，加工精度及 $R_a$ 不太均匀，阴极刚性弱。

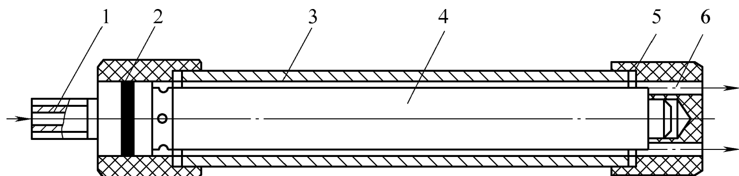



图 3-53　固定式阴极深孔扩孔加工原理

1—电解液入口　2—绝缘定位套　3—工件　4—工具阴极　5—密封垫　6—电解液出口

（2）型孔加工　用于形状复杂、尺寸较小的型孔加工，如四方孔、椭圆等非圆形状的通孔或不通孔的加工，多采用端面进给方式，阴极侧面须绝缘。内锥面高度为 1.5～3.5mm。图 3-54 为断面进给式型孔加工示意图。

**3. 型腔加工**

用于尺寸较大、形状复杂的型腔加工，生产率高，表面质量好，但加工精度不太高。多用于锻模型腔加工，精度控制在 ±0.1 ~ 0.2mm。也采用端面进给法。

阴极设计制造是关键。用成形精度高的电解液或混气加工时，阴极设计较易。为使流场均匀，阴极对应处加开增液孔，如图 3-55 所示。近年来发展用简单形状电极的数控电解加工，柔性好，准备时间减少，电源容量小，但加工速度降低。

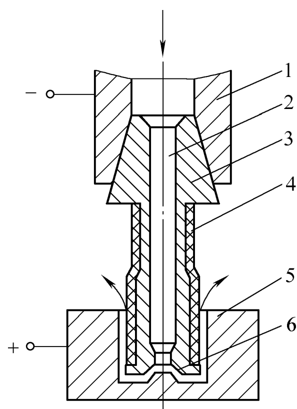



图 3-54　断面进给式型孔加工示意图
1—机床主轴套　2—电解液进口　3—工具电极（阴极）　4—绝缘隔套　5—工件电极（阳极）　6—工具电极型面

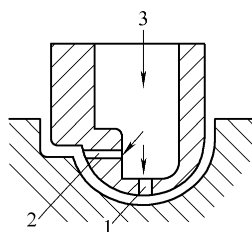



图 3-55　增液孔的设置
1—喷液槽　2—增液孔
3—电解液

**4. 套料加工**

用于等截面的大面积异型孔或异型零件的加工，端面进给加工方式。套料阴极工具如图 3-56 所示。零件尺寸精度由阴极片内腔口保证，偶尔短路烧伤时，只需更换阴极片。

**5. 叶片加工**

叶片型面复杂，精度要求较高，加工批量大，电解加工效果好。加工方式有单面加工和双面加工。机床有立式和卧式两种。多用 NaCl 电解液混气加工。电解加工整体叶轮已普遍应用，直接在轮坯上套料加工叶片（等截面），叶轮强度高，质量好，加工周期大大缩短。电解加工整体叶轮的示意图如图 3-57 所示。

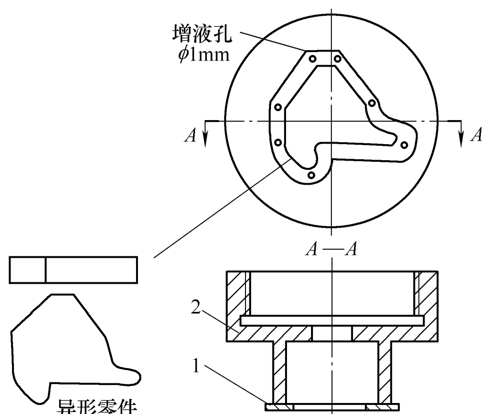



图 3-56　套料阴极工具
1—阴极片　2—阴极体

**6. 电解倒棱去毛刺**

图 3-58 为齿轮的电解去毛刺示意图。加工原理是尖角处电流密度最高。去毛刺时间与加工电压、加工间隙及电

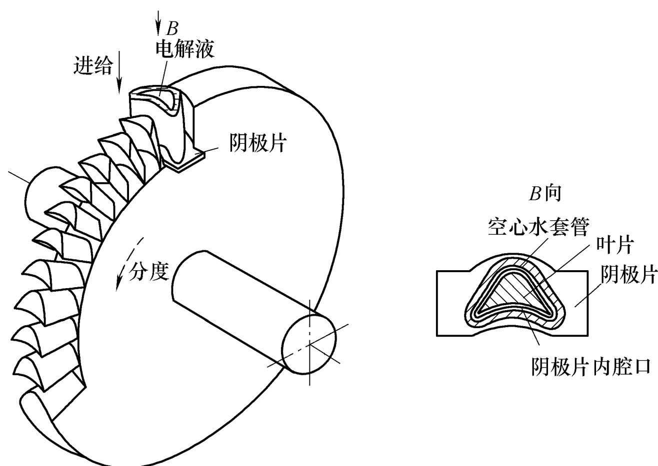



图 3-57　电解加工整体叶轮

解液参数有关。机加工中去毛刺工作量很大，电解去毛刺效率高，节省费用。

**7. 电解磨削**

工件与磨轮保持一定接触压力，突出的磨料使磨轮导电基体与工件之间形成一定间隙。电解液从中流过时，工件产生阳极溶解，表面生成一层氧化膜，其硬度远比金属本身低，易被刮除，露出新金属表面，继续进行电解。电解作用与磨削作用交替进行，实现加工。图 3-59 为电解磨削原理图。

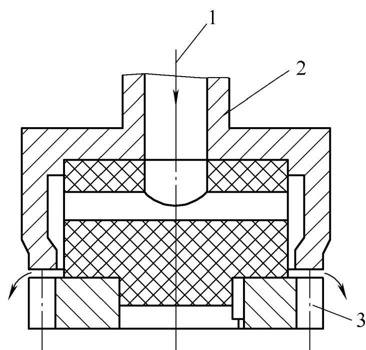



图 3-58　齿轮的电解去毛刺

1—电解液入口　2—设备客体　3—齿轮

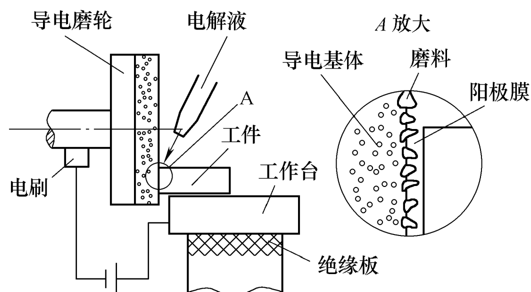



图 3-59　电解磨削原理图

电解磨削效率比机械磨削高，且磨轮损耗远比机械磨削小，特别是磨削硬质合金时，效果更明显。

## 3.8.5　超声波加工

**1. 加工原理**

利用振动频率超过 16kHz 的工具头，通过磨料悬浮液对工件进行成形加工的方法。超声加工原理如图 3-60 所示。

**2. 超声波（Ultrasonic Wave）加工装置**

一般包括超声发生器、超声换能器、变幅杆（振幅扩大棒）、工具头和磨料悬浮液循环系统等。

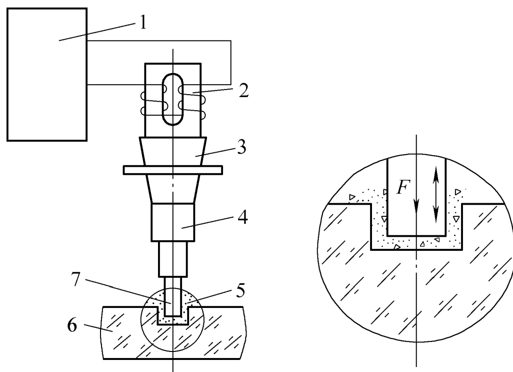



图 3-60　超声加工原理图
1—超声波发生器　2—换能器　3，4—变辐杆
5—磨料悬浮液　6—工件　7—工具头

**3. 超声波加工特点**

1）适于加工各种硬脆材料，特别是非金属材料，如陶瓷、玻璃及各种半导体材料。

2）宏观切削力小，不易引起变形和烧伤，适于加工薄壁、窄缝、低刚度零件。

3）加工精度高，表面质量好。

4）加工机床及工具均较简单。

5）生产率比电火花加工、电解加工等低。

**4. 超声波加工应用**

主要用于对硬脆材料加工圆孔、型孔、套料微细孔，对电火花加工后的各种模具进行抛磨光整加工等。图 3-61 为超声波电火花复合加工小孔装置，图 3-62 为手携式电解超声复合抛光加工装置。

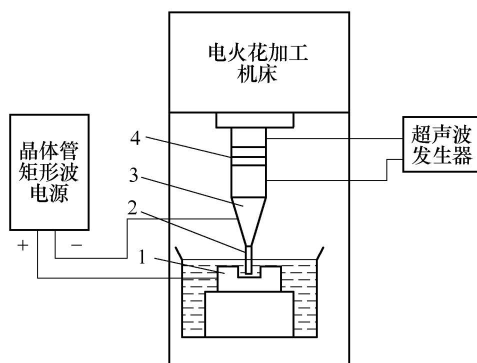



图 3-61　超声波电火花复合加工小孔装置
1—工件　2—工具电极
3—变幅杆　4—压电陶瓷

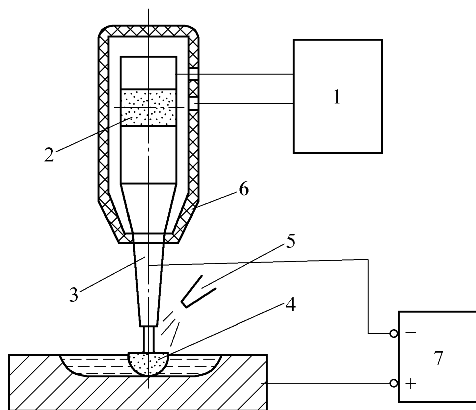



图 3-62　手携式电解超声复合抛光加工装置
1—超声波发生器　2—压电陶瓷换能器　3—变幅杆
4—工具　5—喷嘴　6—外壳　7—电源

## 3.8.6　液体喷射加工

**1. 工作原理及装置**

液体喷射加工又称水刀和水射流，它是利用经水泵及增压器产生高速液体束流或固体微粒的冲击力，再通过一个极细的红宝石喷嘴，以高速对工件进行切割（或打

孔）。喷射加工一般分为液体喷射加工和磨料喷射加工，前者发展较快，应用较广，液体喷射加工装置如图 3-63 所示。

**2. 加工形式**

从水质上分，液体喷射加工形式分为纯水切割和加磨料切割；从结构形式上分可有多种形式，如 2 ~ 3 个数控轴的龙门式结构和悬臂式结构，这种结构多用于切割板材；5 ~ 6 个数控轴的机器人结构，这种结构多用于切割汽车内饰件和轿车的内衬等。

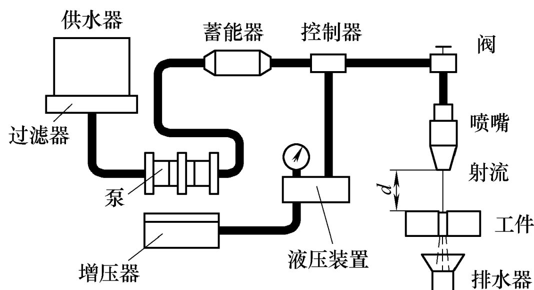



图 3-63 液体喷射加工装置

（1）纯水切割 它利用压力为 $200\times10^6\sim400\times10^6$Pa（最高可达 $1500\times10^6$Pa）的高压水，从孔径为 0.05 ~ 0.4mm 的蓝宝石或金刚石喷嘴孔中以每秒数百米至一千米以上的高速喷出，形成一股高能量密度的射流冲击工件，使材料破碎而去除。割缝约为 0.1 ~ 1.1mm。主要用于切割各种非金属材料，如塑料、橡胶、石棉、石墨、木材、胶合板、石膏、水泥、皮革和纸板等。切割厚度为几毫米至几十毫米，取决于使用的喷射压力和材料的性质。图 3-64 为水切割加工照片。

液体喷射切割的主要特点是：①切缝小，一般为 0.08 ~ 0.4mm；②切割速度高，如切割厚度为 6.4mm，胶合板的切割速度达 1.7m/s；③切屑被液体带走，不致粉尘飞扬，因而能避免环境污染。液体喷射还可用于穿孔、切割薄金属材料、金属零件去毛刺和表面清理等。

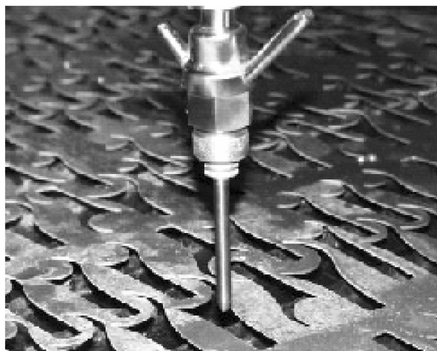


图 3-64 水切割加工

（2）加磨料切割 一定压力（$2\times10^6\sim13\times10^6$Pa）的气体（空气、氮或二氧化碳）和磨料粉末（直径为 10 ~ 50μm）混合后从直径为 0.1 ~ 1.2mm 的喷嘴小孔中高速喷出，利用磨料的冲击破坏作用去除工件上的材料。割缝约为 0.8 ~ 1.8mm。一般使用刚玉或碳化硅磨料，有时还使用玻璃小珠（用于表面抛光）和碳酸氢钠（用于表面清理）。磨料的粒径一般为 40 ~ 70 目，磨料的硬度越高粒径越大，切割能力也越强，喷嘴孔材料采用硬质合金或蓝宝石。喷嘴一般做成笔杆手柄式，便于手工操作；也可将喷嘴安装在夹具上，采用样板导向、缩放仪导向或其他控制装置进行自动化大批量生产。

磨料喷射加工主要用于：①切割玻璃、石英、锗、硅、镓、云母、钨和钛合金等材料的薄片，或开窄槽、打小孔；②使玻璃表面毛化；③从零件表面去除脏物、杂质、氧化层、绝缘层或其他涂层和镀层，以及去除毛刺等；④对集成电路的电阻、电容进行微调。

喷嘴材料及工作条件见表 3-6，工艺参数见表 3-7 和表 3-8。

表 3-6　喷嘴材料及工作条件

| 项目 | 材料 | 孔径/mm | 至工件距离/mm | 喷射角度/(°) |
|---|---|---|---|---|
| 参数 | 金刚石，蓝宝石，淬火钢 | 0.075～0.4 | 2.5～50 | 0～30 |

表 3-7　水喷射加工常用工艺参数

| 工艺参数 | 常用值 | 工艺参数 | 常用值 |
|---|---|---|---|
| 压力/MPa | 70～450 | 喷射力/N | 45～135 |
| 流速/m/s | 300～900 | 功率/kW | 10～40 |
| 流量/L/s | 2.5～7.5 | 磨料耗量/kg/min | 0.1～0.3 |

表 3-8　几种材料高压水切割参数

| 工艺参数、效率、精度 | 石材 | 玻璃 | ABS 塑料 | 皮革 |
|---|---|---|---|---|
| 工件厚度/mm | 25 | 12 | 2.8 | 4.45 |
| 喷嘴孔径/mm | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 0.1 |
| 流体压力/MPa | 400 | 400 | 258 | 300 |
| 切割速度/(m/min) | 0.1 | 0.1 | 0.85 | 0.55 |
| 切缝宽度/mm | 0.5 | 0.5 | 0.2 | 0.2 |
| 切割精度/mm | ±0.05 | ±0.05 | — | — |
| 表面粗糙度 $R_a$/μm | 12.5 | 12.5 | — | — |

**3. 加工精度**

液体喷射加工精度为 0.1～0.25mm，切割精度取决于机器精度、切割工件尺寸范围及切割工件的厚度和材质，通常机器的系统定位精度为 0.01～0.03mm。

**4. 用途**

1）切割非可燃性材料，如大理石、磁砖、玻璃、水泥制品等材料，这是热切割无法加工的材料，图 3-65 为水切割加工样品。

2）切割可燃性材料，如钢板、塑料、布料、聚氨酯、木材、皮革、橡胶等，以往的热切割也可以加工这些材料，但容易产生燃烧区和毛刺，而水切割加工不会产生燃烧区和毛刺，被切割材料的物理、力学性能不发生改变，这也是水切割的一大优点。

3）切割易燃易爆材料，如弹药和易燃易爆环境内的切割，这是其他加工方法无法取代的。

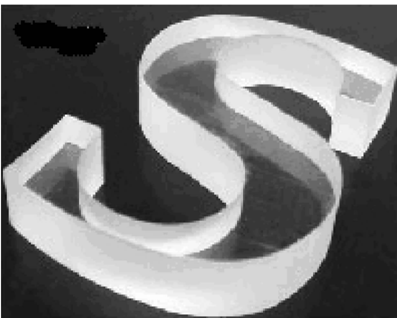


图 3-65　水切割加工样品

## 3.8.7　电解磨削

电解磨削（Electrolytic Grinding，ECG）是电解作用与机械磨削相结合的一种特种加工方法，属于电化学机械加工，又称为电化学加工（Electro Chemical Machining,

ECM)。电解磨削比电解加工具有更好的加工精度和表面粗糙度，比机械磨削有较高的生产率，但加工精度不易控制。

**1. 加工原理**

电解磨削是利用金属结合剂及微细钻石磨料所组成的导电性砂轮同时进行电解加工与机械研削的方式。砂轮的导电部分为阴极，工件为阳极，接直流电源，磨削时，两者之间保持一定的磨削压力，凸出于磨轮表面的非导电性磨料使工件表面与磨轮导电基体之间形成一定的电解间隙（约 0.02 ~ 0.05mm），同时向间隙中供给电解液。在直流电的作用下，工件表面金属由于电解作用生成离子化合物和阳极膜。这些电解产物不断地被旋转的磨轮所刮除，使新的金属表面露出，继续产生电解作用，工件材料即不断地被去除，从而达到磨削的目的。电解磨削原理图如图 3-66 所示。

电解液一般采用硝酸钠、亚硝酸钠和硝酸钾等成分混合的水溶液，不同的工件材料所用电解液的成分也不同。导电磨轮由导电性基体（结合剂）与磨料结合而成，主要为金属结合剂金刚石磨轮、电镀金刚石磨轮、铜基树脂结合剂磨轮、陶瓷渗银磨轮和碳素结合剂磨轮等，按不同用途选用。

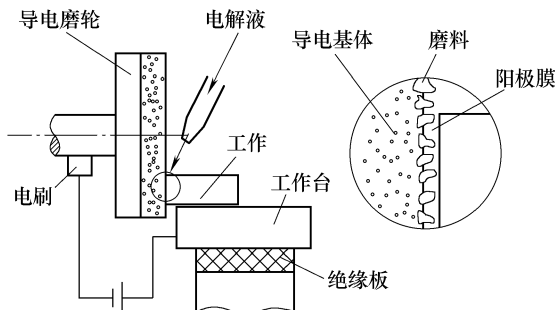



图 3-66　电解磨削原理图

**2. 电解磨削的应用**

电解磨削适合于磨削各种高强度、高硬度、热敏性、脆性等难磨削的金属材料，如硬质合金、高速钢、钛合金、不锈钢、镍基合金和磁钢等。用电解磨削可磨削各种硬质合金刀具、塞规、轧辊、耐磨衬套、模具平面和不锈钢注射针头等。电解磨削的效率一般高于机械磨削，磨轮损耗较低，加工表面不产生磨削烧伤、裂纹、残余应力、加工变质层和毛刺等，表面粗糙度 $R_a$ 一般为 0.63 ~ 0.16μm，最高可达 0.04 ~ 0.02μm。

## 3.8.8　电铸加工

进入 21 世纪，社会结构随着信息化和高消费化而导致工程塑料复制品泛滥成灾。电铸技术作为复制技术在金属薄膜制造、铸造用模具制造中有着广泛的应用。同时，作为工程塑料成型模具的制造技术已经具有重要地位。

电铸（electroforming）是利用金属的电解沉积原理来精确复制某些复杂或特殊形状工件的特种加工方法。它是电镀的特殊应用。

**1. 加工原理**

电铸加工原理图如图 3-67 所示，如同电镀一样是利用电化学反应的电沉积技术。把预先按所需形状制成的原模作为阴极，用电铸材料作为阳极，一同放入与阳极材料相同的金属盐溶液中，通以直流电。在电解作用下，处于阳极的电铸材料会逐渐变为

金属离子进入电解液中，并向作为阴极的原模上沉积，原模表面逐渐沉积出金属电铸层，达到所需的厚度后从溶液中取出，将电铸层与原模分离，便获得与原模形状相对应的金属复制件。

根据电铸时材料的不同，电铸有电铸铁、电铸铜和电铸镍等三种方法。有时也用金、银、铂、镍-钴、钴-钨等合金，但以镍的电铸应用最广。这是因为电铸镍有较高的机械强度和硬度，表面粗糙度低；但它电铸时间长，价格高。电铸铜的速度快，价格低，但机械强度较低，耐磨性也不如镍。电铸层厚度一般为 0.02 ~ 6mm，也有厚达 25mm 的，电铸件与原模的尺寸误差仅几 μm。

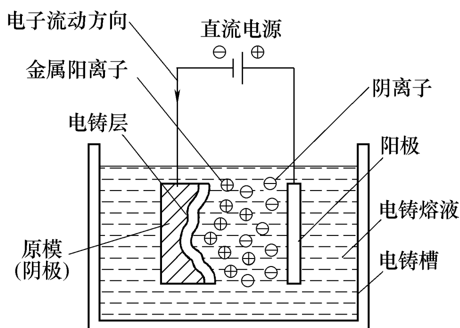



图 3-67　电铸加工原理图

原模的材料有石膏、蜡、塑料、低熔点合金、不锈钢和铝等。原模一般采用浇注、切削或雕刻等方法制作，对于精密细小的网孔或复杂图案，可采用照相制版技术。非金属材料的原模须经导电化处理，方法有涂敷导电粉、化学镀膜和真空镀膜等。对于金属材料的原模，先在表面上形成氧化膜或涂以石墨粉，以便于剥离电铸层。

电铸设备由电铸槽、直流电源（一般是 12V，几百至几千安）及搅拌和循环系统、加热或冷却等装置组成。电铸溶液采用含有电铸金属离子的硫酸盐、氨基磺酸盐、氟硼酸盐和氯化物等的水溶液。

电沉积技术的构成如图 3-68 所示。电铸与电镀的最大不同是，电镀的产品是被镀件和产品的复合体。而电铸则只是以电沉积层为所需要的制品。最终要将镀层与母型脱离。电铸与电镀的不同见表 3-9。

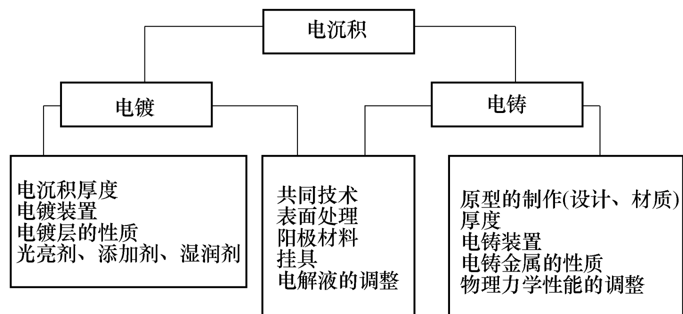



图 3-68　电沉积技术的构成

**2. 电铸装置的构成**

电铸装置由非金属导体化设备、母型剥离设备、电源和进行电铸的电解槽等构成。根据电铸的目的不同而会有各种不同的设备。例如，为了非金属表面金属化，所需要的化学镀装置，有喷镀法装置，也有浸镀法装置；而电源也有用到高压性能好的开关

电源；阳极则考虑到溶解的充分而选用球状阳极等。

表 3-9　电铸与电镀的不同点

| 项目 | 电铸 | 电镀 |
|---|---|---|
| 电沉积金属的结合力 | 要求可以从基体剥离 | 要求与基体有强的结合力 |
| 电沉积层的厚度 | 0.0005 ~ 0.2mm 以上 | 0.001 ~ 0.05mm |
| 目的 | 母型、样品复制以利精密成型 | 制品的防蚀、制品的装饰 |
| 沉积层的种类 | 镍、铜、金、铂、银、铁、铅、镍钴合金等 | 所有可以电镀的金属和合金、复合层 |

电铸过程与原型的制作，与导电层的获得方法（化学的物理的），利用酸和碱的剥离方法，电沉积金属的性质、设备和装置有关。主要系统包括电沉积的金属、电解液、模型、设备等。系统原型的制作，与原型的所用的材料有关，电铸、导体和非导体的电铸有不同的电铸液和工艺。

（1）原型制作　原型的制作有金属、石蜡、石膏、树脂原型法，蜡加工有机械加工法、手工法、模压、雕刻法等，金属、树脂、玻璃有化学加工法等。原型材料现主要采用金属、树脂、玻璃等，电铸制品的精度和细微化可以利用光学和化学的方法获得。这种方法多用于非导体原型。经过研磨的玻璃板涂覆感光涂料，经感光后制作成树脂图形，可以经蚀刻而制成原型。另外，也有在金属或玻璃基材表面制作塑料图形后再进行化学蚀刻来制作原型。这种用光化学方法制作的原型用来进行光碟模的电铸。还有用机械加工方法制作的原型，用来制作反射镜的电铸。

（2）非导体的电铸　如果原型是树脂或玻璃等非导体，在电铸前进行表面的导电化。这种导电化有湿法的化学镀和干法的真空镀等，镀层有银、铜、镍等金属膜。化学镀方法有利用不同金属的电位差的置换法和利用还原剂的还原法，但多半是利用还原剂法。真空镀是在真空条件下使放电离子向阴极耙电极冲击而将金属溅射到被镀件上去的方法。

非导体表面导电化后就可根据工艺流程进行电铸。如果以这种所得到的电铸模作原型，可以再在上面电铸出相反形状的电铸模，即在阴模上电铸出阳模，在阳模上电铸出阴模。以往在非导体上电铸要经历低温度、低浓度、低电流密度（$2A/dm^2$）的第一层膜的电镀，现在随着电源和电铸槽的改良及电铸流程的电子化、表面金属化的改良，现在已经不需要进行第一次电镀就直接进入电铸流程。

（3）电铸液　电铸工艺因所用金属材料的不同和所用电铸液工艺不同而有所不同，电铸分类见表 3-10。

表 3-10　电铸分类

| | | | |
|---|---|---|---|
| 镍电铸 | 氨基磺酸镍液，硫酸镍液 | 钴电铸 | 氨基磺酸钴、硫酸钴 |
| 铜电铸 | 氰化铜，硫酸盐镀铜，焦磷酸盐镀铜 | 金电铸 | 氰化液 |
| 铁电铸 | 氨基磺酸铁 | 银电铸 | 焦磷酸盐镀液、氰化液 |

对电铸来说，影响电铸金属质量的是电铸的结晶过程。最终是受电铸溶液的物理、

化学性质的影响。电铸金属离子的浓度对最大电流密度有影响；镀液的密度和粘度对过滤的效率有影响；电导度对金属离子的迁移、离子扩散系数对极限电流密度、电导度对电流密度、表面张力对气体的逸出和针孔的形成等都有影响。对这些因素的影响的综合考虑，决定电铸液的组成。用于光盘母盘电铸制作的镍的氨基磺酸盐电铸液见表3-11。

**表3-11　氨基磺酸镍镀液的组成**

| 成分 | 工艺参数 | 镀液中的作用 |
|---|---|---|
| 氨基磺酸镍 | 450～500g/L | 提供镍离子 |
| 硼酸 | 35～40g/L | pH值的缓冲 |
| 表面活性剂 | 1.5ml/L | 表面张力调整 |
| pH值 | 3.5±2 | 电流效率、电流密度的稳定性 |
| 温度 | 30～50℃ | 离子的扩散，防止气体的聚集 |
| 表面张力 | $(33\pm3)\times10^{-5}$N/cm | |

### 3. 电铸加工的特点

1）电铸件与母模的形状吻合程度很高，只要母模制造精确，电铸件的精度就能满足要求，其表面粗糙度 $R_a$ 可达0.1μm，能准确、精密地复制复杂型面和细微纹路。

2）能获得尺寸精度高、表面粗糙度 $R_a$ 优于0.1μm的复制品。同一原模生产的电铸件一致性极好。

3）电铸成形是采用沉积法成形，不管多么复杂的形状，采用电铸成形均能很好的复制它还可以成形用机械加工难以成形，甚至无法成形的型腔。

4）电铸镍有很好的机械强度，其电铸件硬度可达35～50HRC，不用热处理即可投入使用。

5）母模的制作较为简单，它并不限于金属材料，借助环氧树脂、塑料、石膏、蜡等原模材料（需对表面作导电处理），可把复杂零件的内表面复制为外表面，外表面复制为内表面，然后再电铸复制，甚至用制品零件都可直接作为母模，适应性广泛。

6）电铸件的制造周期较长，一般每小时电铸金属层的厚度为0.02～0.05mm，如电铸镍，通常需数天时间。采用高浓度电铸溶液，并适当提高溶液温度和加强搅拌等措施，可以提高电流密度，缩短电铸时间，从而可以提高电铸效率。这种方法在镍的电铸中已获得应用。

7）电铸层较薄，常为4～8mm，且厚度不易均匀，且电铸件有较大的内应力，需经适当热处理。

### 4. 电铸加工主要应用

1）精确复制微细、复杂和某些难于用其他方法加工的特殊形状工件，例如，制作纸币和邮票的印刷版、唱片压模、铅字字模、金属艺术品复制件、反射镜、表面粗糙度样块、微孔滤网、表盘、电火花成形加工用电极、高精度金刚石磨轮基体等。

2）复制注塑用的模具、电火花型腔加工用的电极工具。

3）制造复杂、高精度的空心零件和薄壁零件。

4）制造表面粗糙度标准样块、反光镜、表盘、异形孔喷嘴等特殊零件。

## 3.9　数控加工设备

随着科学技术的飞速发展和经济竞争的日趋激烈，产品更新速度越来越快，产品研制生产周期越来越短，多品种、中小批量生产的比重明显增加。同时，随着航空工业、汽车工业和轻工业消费品生产的高速增长，复杂形状的零件越来越多，精度要求也越来越高，传统的加工设备和制造方法已难于适应这种多样化、柔性化与复杂形状零件的高效高质量加工要求。因此，近几十年来，世界各国十分重视发展能有效解决复杂、精密、小批多变零件加工的数控加工技术。在加工设备中大量采用以微电子技术和计算机技术为基础的数控技术，将机械技术与现代控制技术、传感检测技术、信息处理技术、网络通信技术有机地结合在一起，使机械制造业的生产方式发生了革命性的变化。

现代数控机床是信息集成、系统自动化的基础设备，是典型的光机电一体化加工设备，也是现代柔性制造单元（FMC）、柔性制造系统（FMS）的基本组成设备。它将复杂的机床内传动链解耦，代之以软件控制机床进行两坐标联动、三坐标联动、四坐标联动、五坐标联动加工，可完成复杂表面的加工，极大提高机电产品和设备的精度，使其外形更加美观，更易体现个性化。数控机床良好的加工精度和加工一致性，可保证产品零部件的标准化、系列化，并使它们达到良好的互换性。

图 3-69 是数控机床加工过程框图。从框图中可看出，数控加工所涉及的范围比较广，与相关的配套技术有密切的关系。

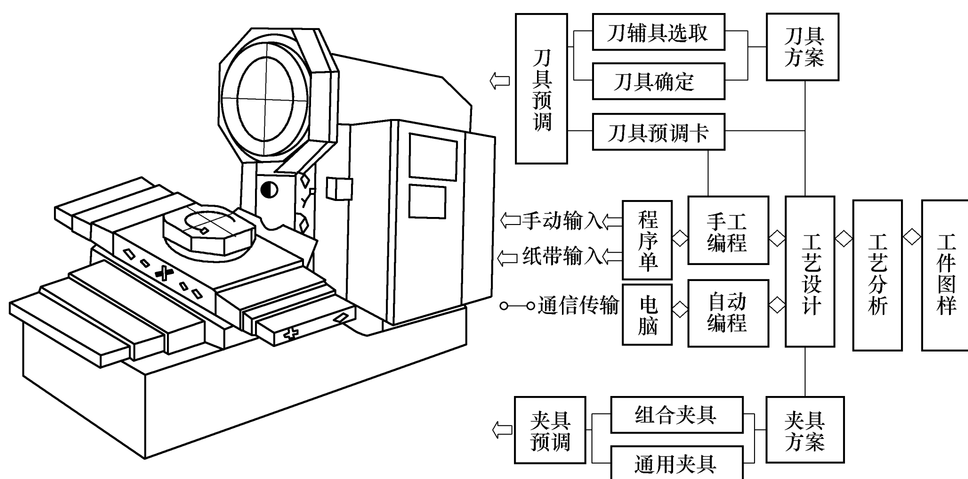



图 3-69　数控机床加工过程框图

### 3.9.1 CJK6240 数控车床

#### 1. 机床组成及功能

CJK6240 型数控车床是一种经济型数控车床，配置西门子公司的 SINUMERIK 802S 数控系统，由步进电动机驱动，带有四刀位的自动回转刀架和可开闭式半封闭防护门，能完成内径、外径、切断、倒角外圆柱面、任意锥面、圆弧面、端面和公/英制螺纹等各种车削加工。该车床适合于多品种、中小批量产品的加工，对复杂异型面、加工精度要求高的零件更能显示其优越性。

数控机床的技术参数，反映了机床的性能及加工范围，表 3-12 为 CJK6240 型数控车床的主要技术参数。

表 3-12　CJK6240 型数控车床的主要技术参数

| 名称 | 参数 | 名称 | 参数 |
|---|---|---|---|
| 机床型号 | CJK6240 | 刀架的最大 X 向行程 | 230mm |
| 数控系统 | SIMENS 802S | 刀架的最大 Z 向行程 | 850mm |
| 床身的最大回转直径 | 410mm | 主轴转速 | 12 级,32 ~ 2000r/min |
| 最大车削直径 | 380mm | 进给速度 | X 向,3 ~ 1500mm/min |
| 滑板上最大回转半径 | 180mm | | Z 向,6 ~ 3000mm/min |
| 最大车削长度 | 850mm | 脉冲当量 | X 向,0.005 |
| 刀架工位数 | 4(回转式) | | Z 向,0.01 |

#### 2. 数控车床的操作面板和控制面板

SINUMERIK 802S 的操作面板如图 3-70 所示。机床的控制面板如图 3-71 所示。

SINUMERIK 802S 系统的显示屏幕如图 3-72 所示，各区域的功能见表 3-13。

表 3-13　屏幕符号说明

| 图中元素 | 缩略符 | 含　　义 |
|---|---|---|
| 1. 当前操作区域 | MA、PA 、PR、DI、DG | 加工、参数、程序、通讯、诊断 |
| 2. 程序状态 | STOP、RUN、RESET | 程序停止、程序运行、程序复位 |
| 3. 运行方式 | JOG、MDA、AUTO | 点动方式；手动输入、自动执行；自动方式 |
| 4. 状态显示 | SKP | 程序段跳跃 |
| | DRY | 空运行 |
| | ROV | 快进修调。修调开关对于快速进给也生效 |
| | SBL | 单段运行。只有处于程序复位状态时才可以选择 |
| | M1 | 程序停止。运行到有 M01 指令的程序段时停止运行 |
| | PRT | 程序测试（无指令给驱动） |
| | 1…1000INC 步进增量 | 步进增量：JOG 运行方式时显示所选择的步进增量 |
| 5. 操作信息 | 1 ~ 23 | 分别表示机床的各种状态 |
| 6. 程序名 | | 正在编辑或运行的程序 |

（续）

| 图中元素 | 缩略符 | 含　义 |
| --- | --- | --- |
| 7. 报警显示行 |  | 只有在 NC 或 PLC 报警时才显示报警信息，在此显示的是当前报警的报警号以及其删除条件 |
| 8. 工作窗口 |  | 工作窗口和 NC 显示 |
| 9. 返回键 |  | 软键菜单中出现此键符时表明存在上一级菜单。按下返回键后，不存储数据直接返回到上一级菜单 |
| 10. 扩展键 |  | 出现此符号时表明同级菜单中还有其他菜单功能，按下扩展键后，可选择这些功能 |
| 11. 软键 |  | 其功能显示在屏幕的最下边一行 |
| 12. 垂直菜单 |  | 出现此符号时表明存在其他菜单功能，按下此键后这些菜单显示在屏幕上，并可用光标进行选择 |

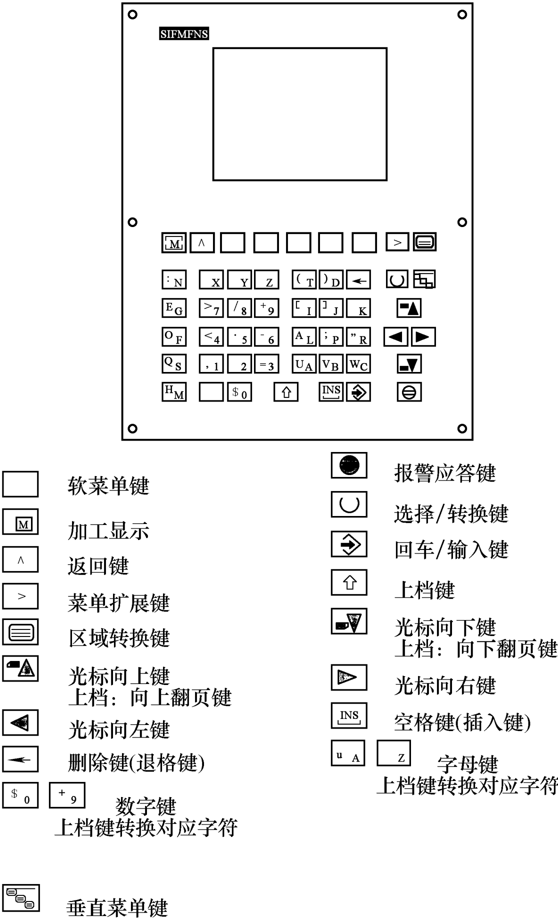



图 3-70　SINUMERIK 802S 超薄操作面板 OP020

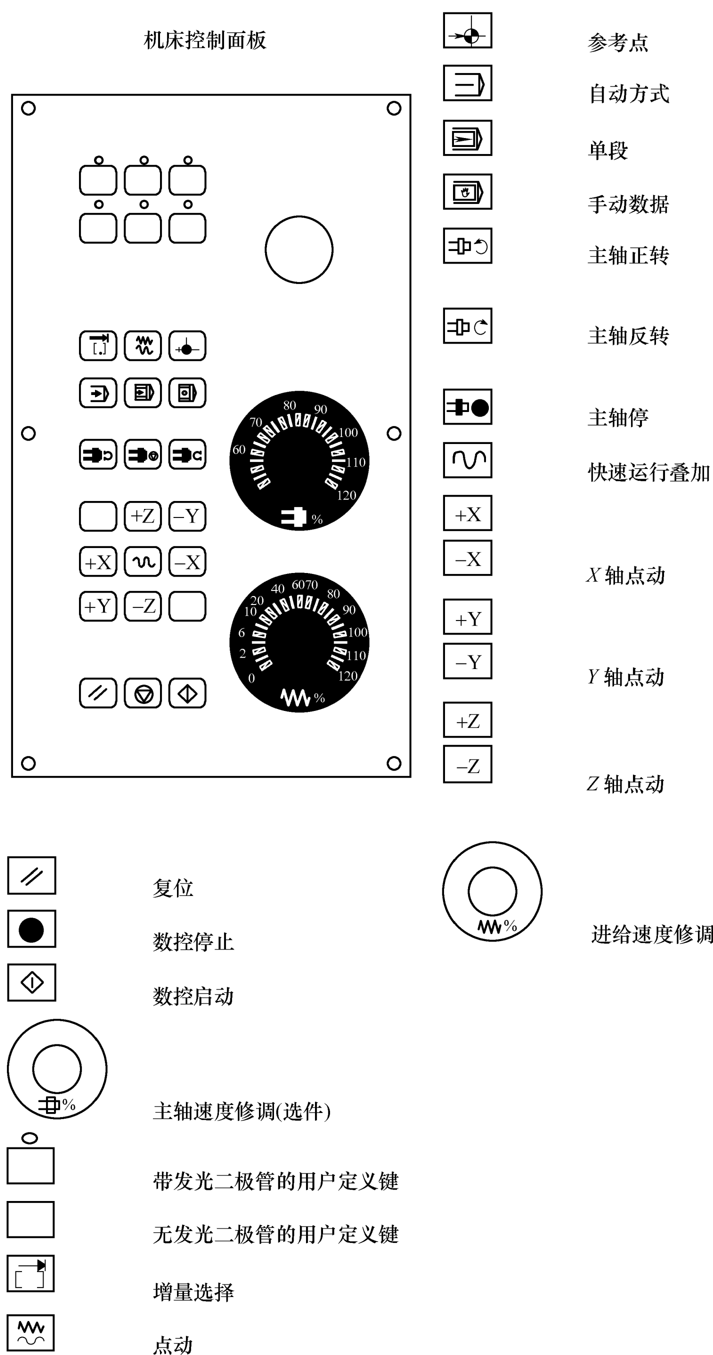

机床控制面板
参考点
自动方式
单段
手动数据
主轴正转
主轴反转
主轴停
快速运行叠加
+X
−X
X 轴点动
+Y
−Y
Y 轴点动
+Z
−Z
Z 轴点动
复位
数控停止
数控启动
主轴速度修调(选件)
带发光二极管的用户定义键
无发光二极管的用户定义键
增量选择
点动
进给速度修调

图 3-71　机床控制面板

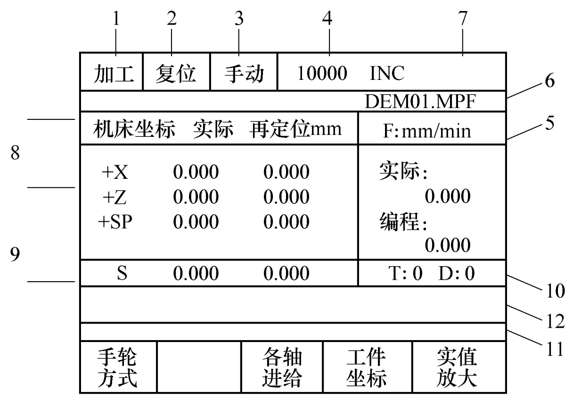



图 3-72　屏幕划分

控制器中的基本功能可以划分为加工、参数、编程、通信和诊断 5 个操作区域。系统开机后首先进入“加工”操作区，使用“区域转换”键可从任何操作区域返回主菜单。如图 3-73 所示。

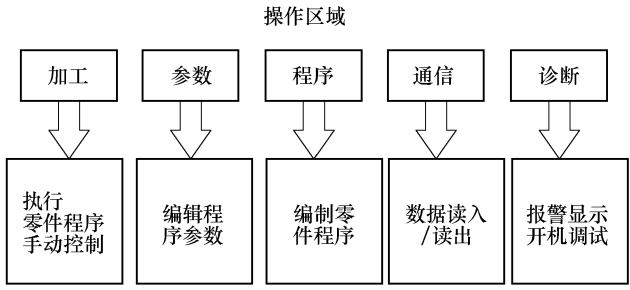



图 3-73　SINUMERIK 802S/C 操作区域

**3. 软件功能**

SINUMERIK 802S 的软件功能如图 3-74 所示。

**4. 适用范围**

适用于各种轴类、盘类及复杂零件的加工，能够自动完成车削多种零件的内外圆、端面、切槽、任意锥面、球面及各种公英制圆柱、圆锥螺纹等工序。并配有完备的 STM 功能，可发出和接收多种信号，控制自动加工过程。

## 3.9.2　XK5025 数控铣床

XK5025 数控立式升降台铣床是三坐标数控铣床，配有 FANUC 0-MD 数控系统，采用全数字交流伺服驱动。加工时，按照待加工零件的尺寸及工艺要求，编制成数控加工程序，通过控制面板上的操作键盘输入计算机，计算机经过处理发出脉冲信号，该信号经过驱动单元放大后驱动伺服电动机，实现铣床的 $X$、$Y$、$Z$ 三坐标联动功能，完成各种复杂形状的加工。

该机床适用于多品种小批量零件的加工，对各种复杂曲线上的凸轮、样板、弧形

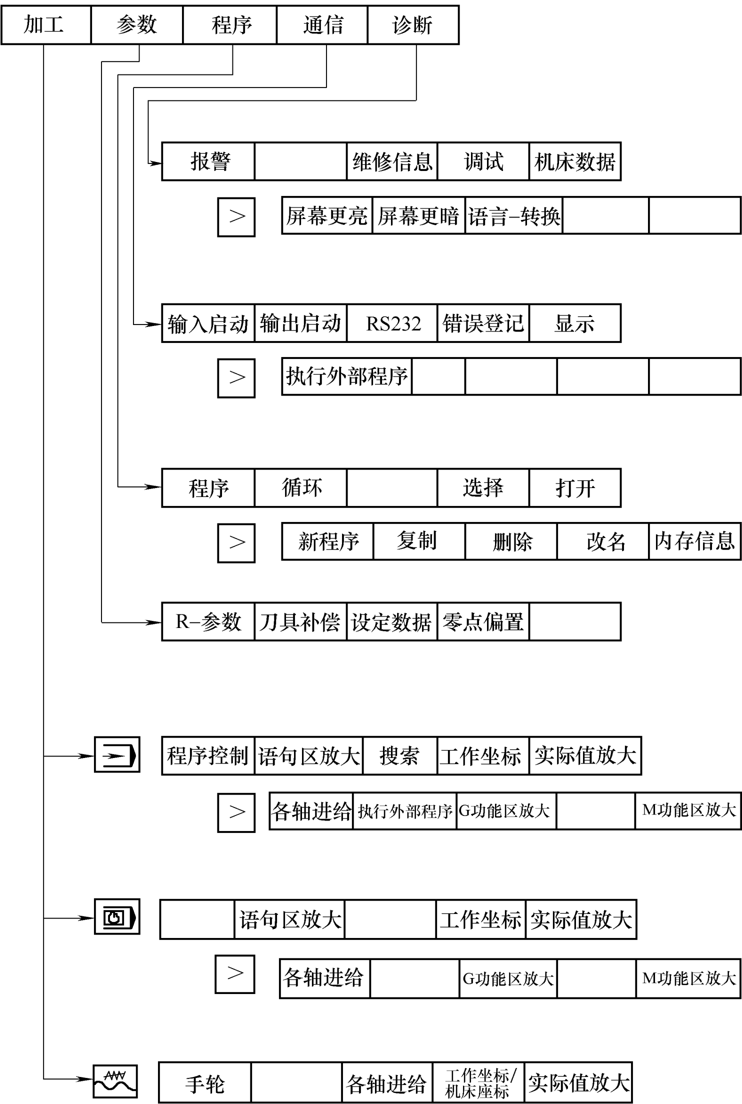



图 3-74　SINUMERIK 802S 软件功能

槽等零件的加工效能尤为显著。机床驱动采用精度高、可靠性好的全数字交流伺服电动机，输出力矩大，高速和低速性能均好，且系统具备手动回机械零点功能，机床的定位精度和重复定位精度较高，不需要模具就能确保零件的加工精度，同时机床所配系统具备刀具半径补偿和长度补偿功能，降低了编程复杂性，提高了加工效率。本系统还具备零点偏置量功能，相当于可以建立多工件坐标系，实现多工件的同时加工，空行程可采用快速方式，以减少辅助时间，进一步提高劳动生产率。

**1. 机床组成**

图 3-75 为数控铣床的结构布局，机床的主轴电动机为双速电动机。通过双速开关

可实现主轴正转和反转的高、低速四挡功能，而每一种功能状态下，又可通过机械齿轮变速达到调速的目的。

机床分为 6 个主要部分，即床身部分、铣头部分、工作台部分、横进给部件、升降台部分、冷却与润滑部分。

(1) 床身　床身内部布筋合理，具有良好的刚性，底座上设有 4 个调节螺栓，便于机床调整水平，冷却液储液池设在机床座内部。

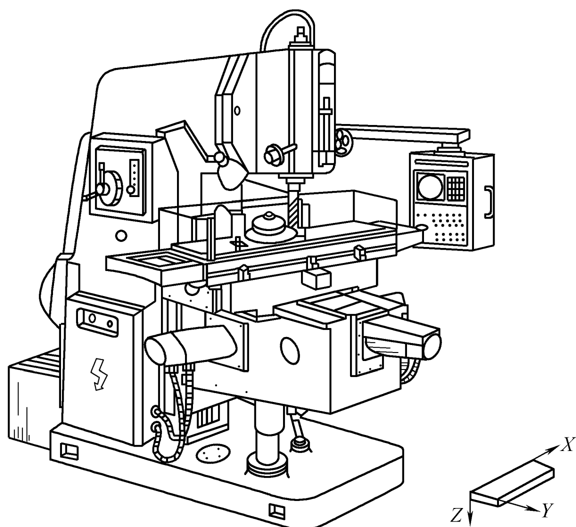



图 3-75　XK5025 型数控铣床的布局

(2) 铣头部分　铣头部分由有级（或无级）变速箱和铣头二个部件组成。铣头主轴支承在高精度轴承上，保证主轴具有高回转精度和良好的刚性，主轴装有快速换刀螺母，前端锥孔采用 ISO#30 锥度。主轴采用机械无级变速，调节范围宽，传动平稳，操作方便。刹车机构能使主轴迅速制动，节约辅助时间，刹车时通过制动手柄撑开止动环使主轴立即制动。启动主电动机时，应注意松开主轴制动手柄。铣头部件还装有伺服电动机、内齿带轮、滚珠丝杆副及主轴套筒，它们形成铅垂向（$Z$ 向）进给传动链，使主轴作铅垂向直线运动。

(3) 工作台　工作台与床鞍支承在升降台较宽的水平导轨上，工作台的纵向进给是由安装在工作台右端的伺服电动机驱动的。通过内齿带轮带动精密滚珠丝杠副，从而使工作台获得纵向进给。工作台左端装有手轮和刻度盘，以便进行手动操作。床鞍的纵横向导轨面均采用了 TURCTTE-B 贴塑面，提高了导轨的耐磨性、运动的平稳性和精度的保持性，消除了低速爬行现象。

(4) 升降台（横向进给部分）　升降台前方装有交流伺服电动机，驱动床鞍作横向进给运动，其传动原理与工作台的纵向进给相同。此外，在横向滚珠丝杠前端还装有进给手轮，可实现手动进给。升降台左侧装有锁紧手柄，轴的前端装有长手柄，可带动锥齿轮及升降台丝杆旋转，从而获得升降台的升降运动。

(5) 冷却与润滑装置　机床冷却系统是由冷却泵、出水管、回水管、开关及喷嘴等组成。冷却泵安装在机床底座的内腔里，冷却泵将冷却液从底座内储液池打至出水管，然后经喷嘴喷出，对切削区进行冷却。机床润滑系统是由手动润滑液压泵、分油器、节流阀、油管等组成。机床采用周期润滑方式，用手动润滑液压泵，通过分油器对主轴套筒、纵横向导轨及三向滚珠丝杆进行润滑，以提高机床的使用寿命。

**2. 技术参数**

机床主要技术参数见表 3-14。

表 3-14　机床主要技术参数

| | | |
|---|---|---|
| 工作台 | 工作台面积（宽 × 长）/mm | 250 × 1120 |
| | 工作台纵向行程/mm | 680 |
| | 工作台横向行程/mm | 350 |
| | 升降台垂向行程/mm | 400 |
| | 工作台允许最大承载/kg | 250 |
| 主轴 | 主轴孔锥度 | ISO 30#（7∶24） |
| | 主轴套筒行程/mm | 130mm |
| | 主轴套筒直径/mm | 85.725mm |
| | 主轴转速范围/（r/min） | 有级 65 ~ 4750<br>无级 60 ~ 3500 |
| | 主轴中心至床身导轨面的距离/mm | 360 |
| | 主轴端面至工作台面高度/mm | 30 ~ 430 |
| 进给速度 | 铣削进给速度范围/（m/min） | 0 ~ 0.35 |
| | 快速移动速度/（m/min） | 2.5 |
| 精度 | 分辨率（脉冲当量）/mm | 0.001 |
| | 定位精度/mm | ± 0.013/300 |
| | 重复定位精度/mm | ± 0.005 |
| | 主轴电动机容量/kW | （3 相）2.2 |

### 3. 操作设备

（1）CRT/MDI 操作面板　图 3-76 为 FANUC 0-MD 系统的 CRT/MDI 操作面板，其主功能如表 3-15 所示，其他键的用途见表 3-16。

表 3-15　CRT/MDI 面板主功能

| 序号 | 主功能 | 键符号 | 用　　途 |
|---|---|---|---|
| 1 | 位置显示 | POS | 在 CRT 上显示机床现在的位置 |
| 2 | 程序 | PRGRM | 在编辑方式，编辑和显示在内存中的程序；在 MDI 方式，输入和显示 MDI 数据 |
| 3 | 偏置量设定与显示 | OFSET | 刀具偏置量数值和宏程序变量的设定与显示 |
| 4 | 自诊断参数 | DGNOS PRARM | 运行参数的设定、显示及诊断数据的显示 |
| 5 | 报警号显示 | OPR ALARM | 按此键显示报警号 |
| 6 | 图形显示 | GRAPH | 图形轨迹的显示 |

表 3-16　CRT/MDI 面板其他键的用途

| 号码 | 名称 | 用　　途 |
|---|---|---|
| 1 | 复位键（RESET） | 用于解除报警，CNC 复位 |
| 2 | 起动键（START） | MDI 或自动方式运转时的循环起动运转，而使用方法因机床而不同 |

（续）

| 号码 | 名称 | 用　　途 |
|---|---|---|
| 3 | 地址/数字键 | 字母、数字等文字的输入 |
| 4 | 符号键（/，#，EOB） | 在编程时用于输入符号，特别用于每个程序段的结束符 |
| 5 | 删除键（DELET） | 在编程时用于删除已输入的字及在 CNC 中存在的程序 |
| 6 | INPUT 键 | 按地址键或数值键后，地址或数值输入键输入缓冲器并显示在 CRT 上，若将缓冲器的信息设置到偏置寄存器中，按 INPUT 键。此键与软键中的 INPUT 键等价 |
| 7 | 取消键（CAN） | 消除键输入缓冲器中的文字或符号。如键输入缓冲显示 N0001 时，若按（CAN）键，N0001 就被消除 |
| 8 | 光标移动键（CURSOR） | 有两种光标移动键：↓使光标顺方向移动；↑使光标反方向移动 |
| 9 | 翻页键（PAGE） | 有两种翻页键：↓为顺方向翻页；↑为反方向翻页 |
| 10 | 软键 | 软键按照用途可以给出种种功能。软键能给出的功能，在 CRT 画面的最下方显示 |
| 11 | 输出起动键(OUTPT START) | 按下此键，CNC 开始输出内存中的参数或程序到外部设备 |

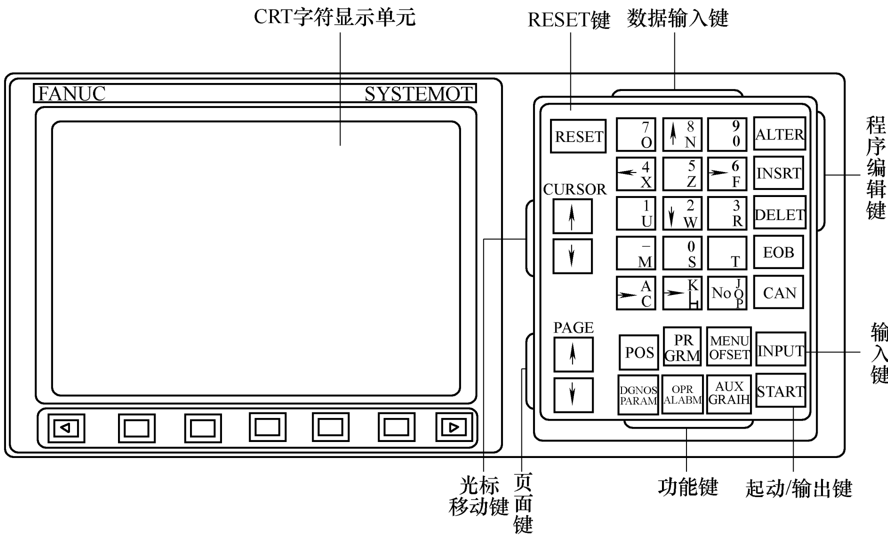



图 3-76　CRT/MDI 操作面板

（2）机床操作面板　机床操作面板如图 3-77 所示。机床的类型不同，其开关的功能及排列顺序有所差异。操作按（旋）钮的功能见表 3-17，表 3-18 为手动操作一览表。

**表 3-17　操作旋钮的功能说明**

| 键（按钮）名称 | 用　　途 |
|---|---|
| 循环起动 | 自动运转的起动，在自动运转中，自动运转指示灯亮 |
| 进给选择 | 自动运转时刀具减速停止 |

（续）

| 键（按钮）名称 | 用　　途 |
|---|---|
| 方式选择 | 选择操作种类 |
| 快速进给 | 刀具快速进给 |
| JOG 步进进给 | 手动连续进给，步进进给 |
| 手轮 | 手轮进给 |
| 单程序段 | 每次执行自动运转的一个程序段 |
| 跳过任选程序段开关 | 跳过任选程序段 |
| 空运转 | 空运转 |
| 返回参考点 | 返回参考点 |
| 快速进给倍率 | 选择快进给倍率的倍率量 |
| 步进进给量 | 选择步进 1 次的移动量 |
| 紧急停止 | 使机床紧急停止时 |
| 锁住选择 | 选择机床锁住 |
| 手动绝对 | 自动运转中插入手动运转时，选择是否将手动移动量加到绝对值寄存器中 |
| 进给速度倍率 | 选择自动运转中，手动运转中进给速度的倍率量 |
| JOG 进给速度 | 选择手动连续进给速度 |
| 选择手轮轴 | 选择手动手轮移动的轴 |
| 选择手轮轴倍率 | 选择手动手轮进给中，1 个刻度移动量的倍率 |

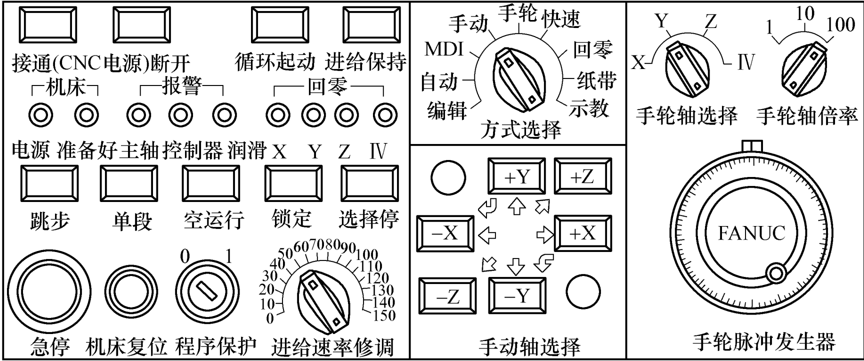



图 3-77　机床操作面板

**表 3-18　手动操作**

| 项目 | 方式选择及进给率修调 | 操作说明 |
|---|---|---|
| 手动参考点返回（单轴） | ZEM | 按“点动轴选择”，选择一个轴 |
| 手动连续进给 | JOG 方式，由进给速度修调旋钮选择点动速度 | 按“点动轴选择”中的“+X、-X、+Y、-Y、+Z 或 -Z”键 |
| 手摇脉冲发生器的手动进给 | HANDLE 方式，选择进给轴 $X$、$Y$ 或 $Z$；由手脉倍率旋钮调节脉冲当量 | 旋转手动脉冲发生器（注意旋向与 $X$、$Y$、$Z$ 轴的移动方向） |
| 主轴手动操作 | HANDLE、手动、点动方式 | 按 CW 或 CCW 或 STOP 键 |
| 冷却泵起停 | 任何方式 | 按 COOL 的 ON 或 OFF 键 |

## 3.9.3　XHK716 型立式加工中心

### 1. 机床组成

XHK716 型立式加工中心为具有自动换刀装置的十字滑座型立式加工中心，可以实现纵向、横向和垂直方向三个坐标、直线插补和任意二轴圆弧插补的连续闭环控制运动。该机床适用于凸轮、箱体、支架、盖板、模具等各种复杂型面零件的小批量加工。工件一次装夹在机床上，可自动连续地完成铣、钻、镗、铰、攻螺纹、锪等多种工序的加工。

XHK716 型立式加工中心主要由基础部件（底座、立柱、十字滑台、工作台）、主轴箱、进给系统、自动换刀装置、液压系统、气动系统等组成，其外形如图 3-78 所示。

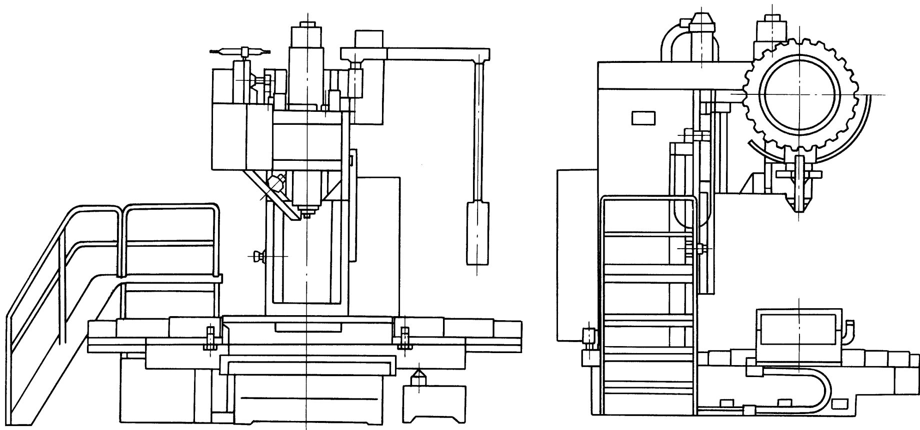


图 3-78　XHK716 型立式加工中心

### 2. 主要技术性能

（1）主要技术参数　XHK716 型立式加工中心的主要技术参数如表 3-19 所示。

**表 3-19　XHK716 型立式加工中心的主要技术参数**

| | |
|---|---|
| 工作台工作面积 | 630mm × 120mm |
| 行程：纵向<br>横向<br>铅垂向 | 1200mm<br>630mm<br>800mm |
| 主轴转速范围 | 25 ~ 2500r/min |
| 主轴转速级数 | 无级（直接编程，增量为 1r/min） |
| 进给速率（$x$，$y$，$z$） | 2 ~ 4000mm/min |
| 快速移动（$x$，$y$，$z$） | 10m/min |
| 刀库容量 | 24 把 |
| 选刀方式 | 任选 |
| 主电动机功率（DC） | 12kW 或 15kW |
| 进给直流伺服电动机（$x$，$y$，$z$） | 38.5N · m |
| 机床电源总功率 | 42kW |

（2）数控装置　FANUC-6MB 数控系统的主要功能如表 3-20 所示。

**表 3-20　FANUC-6MB 数控系统的主要功能**

| | |
|---|---|
| 控制轴数 | X，Y，Z 三轴或增加 A、B、C 中任一轴为第四轴 |
| 同时控制轴数 | X，Y，Z 轴中任意两轴联动或三轴联动 |
| 轨迹控制方式 | 平面直线/圆弧方式或空间直线/螺旋线方式 |
| 纸带代码 | EIA/ISO（标准 8 单位纸带） |
| 程序格式 | 带小数点的地址符可变程序段格式 |
| 最小设定单位 | 0.001mm |
| 最大编程单位 | +99999.999mm |
| 进给速度 | 快速进给速度最高为 15000mm/min，可用参数设定实际最大快进速度。本机床设定为 X，Y，Z 三轴的快进速度均为 10000mm/min。工作时还可利用机床操作面板上的选择旋转开关对指令的速度值进行修调至所需要的百分比值（25%，50%，100%） |
| | 切削进给速度为 1～15000 mm/min；并可用参数设定实际最大进给速度，本机床设定为 4000mm/min。通过机床操作面板上的速度倍率开关还可对实际进给速度进行修调，修调范围为 0～200%，每档间隔为 10%。例如，程序指令的切削进给速度为 F5，程序设定进给速度为 5mm/min，速度倍率开关放在 10% 的位置，实际加工时，进给速度就变为 0.5mm/min |
| 自动加减速 | 在快速进给运动时，不管是手动还是自动方式，进给的起动和停止都具有直线型的自动加减速控制。在切削进给和点动工作状态时，具有指数函数型自动加减速控制。该功能使机床在起动、停止、速度转换过程中能避免阶跃式的速度变化造成的振动噪声和冲击，实现升速和降速时的自动平缓过渡 |
| M、S、T 机能 | 辅助机能（M 机能）：在地址 M 之后，规定两位数字，指定一个辅助机能，用于机床辅助动作的开关控制 |
| | 主轴速度机能（S 机能）：机床主轴转速直接由地址 S 后面的整数指定，该整数最多可为 4 位数。如 S500 表示主轴每分钟转 500 转。XHK716 机床的转速范围为 20～2500r/min |
| | 刀具机能（T 机能）：机床选取刀具由地址 T 及后面的两位整数指定所需要的刀具，如 T12。XHK716 机床的刀库最多可装 24 把刀 |
| 程序号检索与顺序号检索功能 | 利用 MDI 和 CRT 单元可找出由地址“O”（ISO 代码用:）和后缀 4 位整数表示的程序号所指定的程序，并能在所选定的程序内找出由地址 N 后缀 4 位数表示的顺序号所指定的程序段 |
| 外部工件号检索功能 | 用机床操作面板上的 5 个开关的不同状态组合，可得到 00～31 共 32 种组合状态，分别代表预先存储在磁泡存储器里的 32 种零件加工程序。当按压循环起动按钮后，就可自动选择存放在存储器中的相应的要被加工的零件的加工程序 |
| 空运转功能 | 当机床操作面板土的“空运转开关”，放在接通位置时，由数控指令规定的进给速度变为无效，此时的进给速度变为由点动（JOG）方式时的速度选择开关所选定。该开关有 24 档速度，由 1.0～2000mm/min。在空运转开关接通时，快速运动（G00）速度继续有效。此功能可以提高程序校验的效率。因此它可使低速进给时的插补运算等工作在高速下运行，而机床不动作 |

（续）

| | |
|---|---|
| 任选程序段删除功能 | 在机床操作面板土的程序段删除开关放在接通位置时，凡开头有删除符号（/）的程序段不被执行即无效。但若删除开关接通前，该程序段已读入缓冲寄存器，则会继续有效 |
| 单程序段功能 | 将机床操作面板上的单程序段开关放在接通位置时，每次按压循环起动按钮，只执行零件加工程序中的一个程序段，即可以一个程序段、一个程序段地执行完全部加工程序。此功能主要用于检查指令和进行加工 |
| 机械锁住和辅助机能锁住 | 当机床操作面板上的机械锁住开关接通时，执行移动指令所产生的进给脉冲被抑制，不送往位置伺服驱动系统，因此机床不产生进给运动。但全部数控程序照常被执行，位置显示仍按程序进行改变，M、S、T 功能照常执行。机械锁住功能用来调试校验程序，通过观察显示器上位置数字的变化了解程序是否与加工要求相一致。当机床操作面板上的辅助机能锁住开关处于接通位置时，M、S、T 代码的指令不执行，即禁止自动换刀、主轴、冷却液等机械动作。数控系统只执行程序中的进给指令。该功能也用于检索程序 |
| 进给保持功能 | 在自动或手动控制的运行中，按下机床操作面板上的进给保持按钮，能使所有轴或某个轴的进给停止，当再按下循环起动按钮时，则重新运行 |
| 暂停功能 | 根据加工需要，可用程序指令（G04），在一个程序段执行完毕以后，暂停一段指定长的时间后，再执行下一个程序段。在加工中途需进行某种操作时，也可操作外部按钮实现机床运动的暂停和继续加工 |
| 急停功能 | 在数控设备工作时，当发生任何异常现象需紧急处理时，按下急停按钮，则停止执行一切指令，瞬时停止设备运行 |
| 手动连续进给功能 | 手动微动进给时，微动进给速度可用 24 位旋转开关进行切换。速度范围为 0 ~ 2.000 mm/min。手动快速进给时，能对用参数设定的快速进给速度加以修调 |
| 手动增量进给功能 | 选择不同的增量进给量能够进行高效率的定位控制。增量值在公制时有 0.001mm、0.01mm、0.1mm、1mm、10mm、100mm6 种 |
| 手摇脉冲发生器进给 | 旋转手摇脉冲发生器可使坐标轴移动相应距离，每旋转一圈发出 100 个脉冲，脉冲当量有 0.001mm、0.01mm、0.1mm 三档可供选择 |
| 间隙补偿功能 | 间隙补偿功能用来补偿机械传动系统正、反向旋转时产生的固有间隙，间隙大小可通过测定得到，然后将测得的间隙量预先设置在相应的参数单元中。间隙补偿量的范围为 0 ~ 255 个脉冲。在每次坐标轴运动方向反向时，数控系统就送出预先设置的补偿量以补偿机械正、反向旋转时的固有间隙 |
| 自诊断功能 | 伺服系统校验：检查误差寄存器的误差是否过大，位置检测与速度控制是否正常，伺服电动机是否过热等 |
| | 数控系统校验：检查各种存储器和微处理器工作是否正常，数控柜是否过热 |
| | 状态显示：用 CRT 显示数控系统工作状态和输入、输出信号的状态 |

**3. 传动系统**

XHK716 型立式加工中心的传动系统原理图如图 3-79 所示，主轴与变速箱分为两体，主轴 3 与变速箱的Ⅳ轴是通过十字键块 2 联接来传递转矩。主传动系统由功率为

15kW 的主电动机（宽调速直流电动机）1 驱动。主电动机装于主轴箱顶部，通过Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ轴传至主轴 3，Ⅰ、Ⅱ轴间的传动和Ⅱ、Ⅲ轴间的传动均为齿轮定比传动。Ⅲ轴上装有一个双联滑移齿轮，通过液压缸操纵，可分别与Ⅳ轴上的两个固定齿轮啮合，从而使主轴 3 获得两个固定的机械变速档。再通过主电动机的无级调速，可使主轴得到 25～2500 r/min 的变速范围。

纵向、横向和垂直方向的进给运动分别采用永磁式直流伺服电动机 9、4、7 驱动，通过张紧环结合子 8、5、6 将运动直接传递给各进给滚珠丝杠，从而带动工作台、十字滑台、垂向滑座，实现三个方向的进给运动。

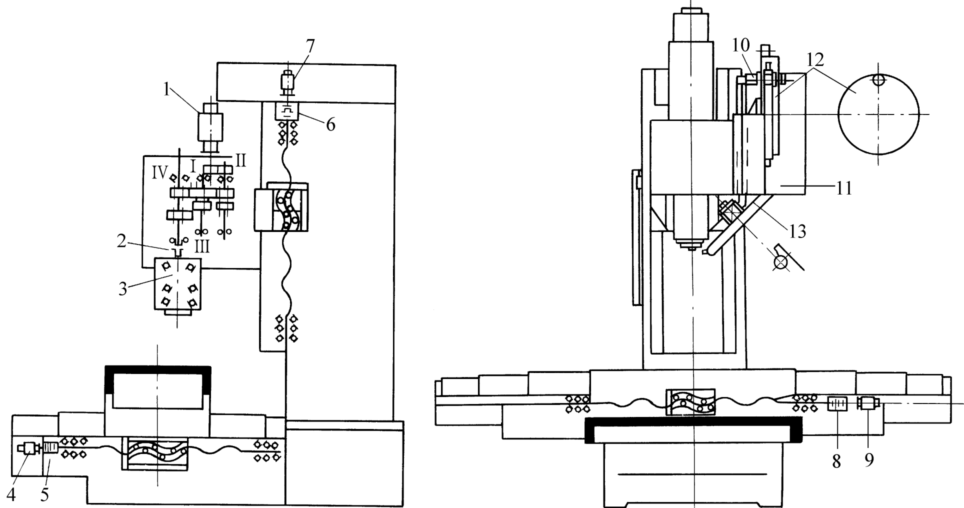



图 3-79　传动系统原理图

1—主电动机　2—十字键块　3—主轴　4，7，9—伺服电动机　5，6，8—张紧环结合子
10—液压马达　11—刀库底座　12—单盘式刀库　13—机械手手臂

#### 4. 自动换刀装置

自动换刀装置的用途是按照加工需要，自动地更换装在主轴上的刀具。机械手安装在主轴箱的左侧面，随同主轴箱一起在立柱上运动。换刀装置由单盘式刀库 12、刀库底座 11、液压马达 10、双臂回转机械手组成，能实现在刀库与机床主轴之间装卸和传递刀具所需要的全部动作。

（1）自动换刀的工作过程　图 3-80 所示为换刀过程的示意图。换刀的大致过程见表 3-21。

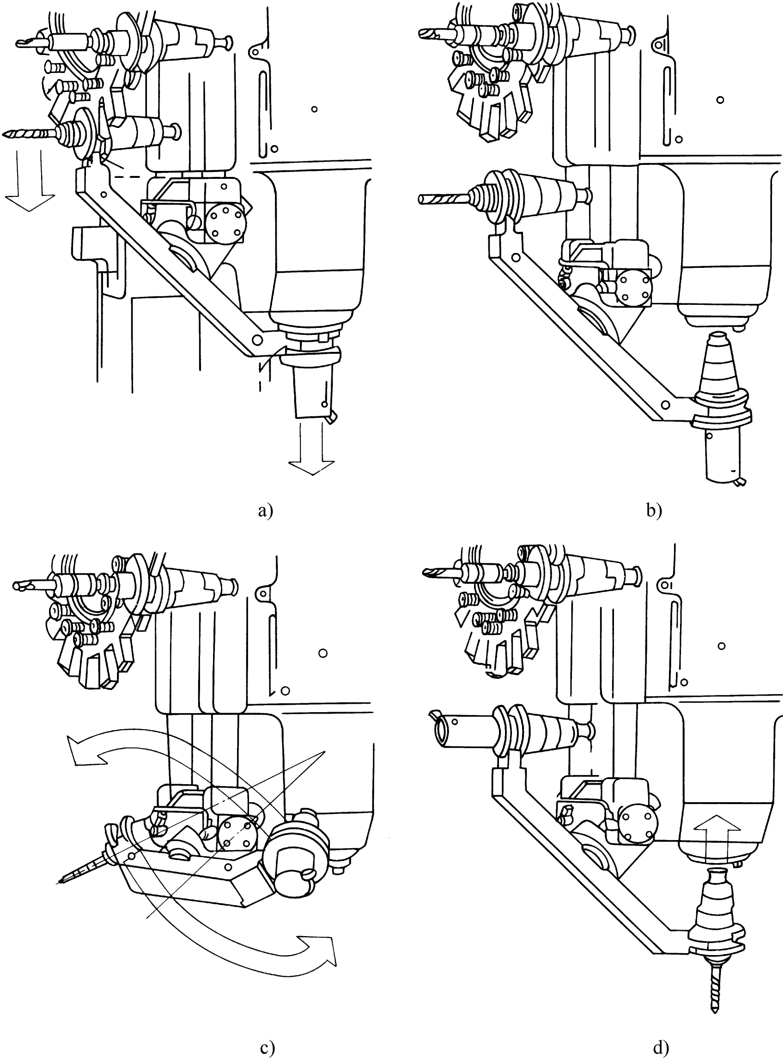
**表 3-21　自动换刀的工作过程**

| 顺序 | 内　　容 |
|---|---|
| 1 | 主轴箱回到最高处（$z$ 坐标参考点），同时主轴停止回转并定向 |
| 2 | 机械手大臂转动抓住主轴和刀库上的刀具 |
| 3 | 主轴和刀库上的刀具松开（见图 3-80a） |
| 4 | 机械手下移从主轴和刀库上取出刀具（见图 3-80b） |

（续）

| 顺序 | 内　容 |
|---|---|
| 5 | 机械手大臂转动 180°，换刀（见图 3-80c） |
| 6 | 机械手上移将更换后的刀具装入主轴和刀库（见图 3-80d） |
| 7 | 主轴和刀库分别夹紧刀具 |
| 8 | 机械手松开主轴和刀库上的刀具 |
| 9 | 当机械手大臂转动至水平状态时，限位开关发出“换刀完毕”的信号，可以开始加工或进行其他程序动作 |

在自动换刀的整个过程中，各项运动均由限位开关控制，只有前一个动作完成后，



a)　b)　c)　d)

图 3-80　换刀过程图

才能进行下一个动作，从而保证了运动的可靠性。自动换刀时间：刀具-刀具约 5s。

（2）刀库　如图 3-79 所示，刀库的回转用液压马达 10 通过齿轮、内齿圈带动装有刀具的刀盘 12 旋转，刀盘支承在轴承上，而轴承固定在刀库底座 11 上。

图 3-81 所示为刀库定位及松、夹刀具的结构简图。刀库的定位是由接近开关控制电磁阀使液压马达停止转动，由双向液压缸 7 带动定位销 5，插入刀盘 4 上的定位孔，实现精确定位。在刀盘 4 的每一个刀位上都装有如图所示的弹簧、导柱 2、键块 1 和长销 6 所组成的刀具固定装置。在弹簧压缩力作用下，导柱 2 向上运动，同时带动键块 1 和固定在键块上的长销 6 向上运动。当健块 1 和长销 6 插入卡在刀盘上的刀柄凸缘上的健槽和孔内时，就实现了刀具在刀库上的固定。图中所示即为刀具卡在刀盘上并被固定的状况。当单向液压缸 3 通油后，将导柱拉下，使键块 1 和长销 6 退出，此时刀具在刀盘上处于自由状态。控制刀具固定装置的单向液压缸 3 有两个：一个与定位销连在一起，自动换刀时用；另一个在靠近立柱方向的部位，用于刀库手动装刀。刀库可装 24 把刀，最大刀具直径为 120mm。相邻刀座不装刀时，最大刀具直径可为 200mm。刀具的选择方式为任选，通过可编程序控制器（PC），记忆每把刀具在刀盘上的位置，自动选取所需要的刀具。

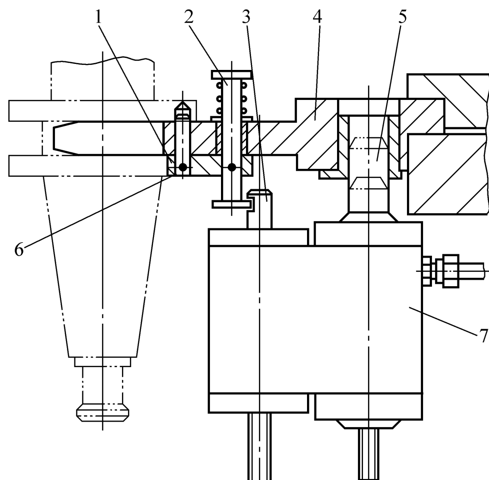


图 3-81　刀库定位及松、夹刀具的结构简图
1—键块　2—导柱　3—单向液压缸　4—刀盘
5—定位销　6—长销　7—双向液压缸

（3）机械手　图 3-82 所示为机械手的结构图。机械手由机械手臂和 45°的斜壳体组成。机械手臂 1 形状对称，固定在回转轴 2 上，回转轴与主轴成 45°角，安装在壳体 3 上。液压缸 4 中的齿条通过齿轮带动回转轴 2 转动，从而实现手臂正向和反向 180°的旋转运动。

机械手对刀具的夹紧和松开是通过液压缸 5，碟形弹簧 6 及拉杆 7、杠杆 8、活动爪 9 来实现的。碟形弹簧实现夹紧，液压缸实现松开。在活动爪中有两个销子 10，在夹紧刀具时，插入刀柄凸缘的孔内，确保夹持安全、可靠。

**5. 数控系统**

SYSTEM6 数控系统是日本 FANUC 公司的产品，其结构如图 3-83 所示。该数控系统采用 8086 十六位微处理器，地址总线长 20 位，数据总线长 16 位，使用公共的本机（LOCAL）总线，通过总线控制器进行控制。系统的主振频率为 5MHz。数控系统的基本软件存放在 30 块 2732EPROM 存储器内，系统的基本软件为 120KB。

输入/输出装置有读带机、手动控制单元（MDI）、CRT 屏幕显示单元、机床操作面板、手摇脉冲发生器等。它们可以将各种设定的数据、参数、程序通过输入、输出

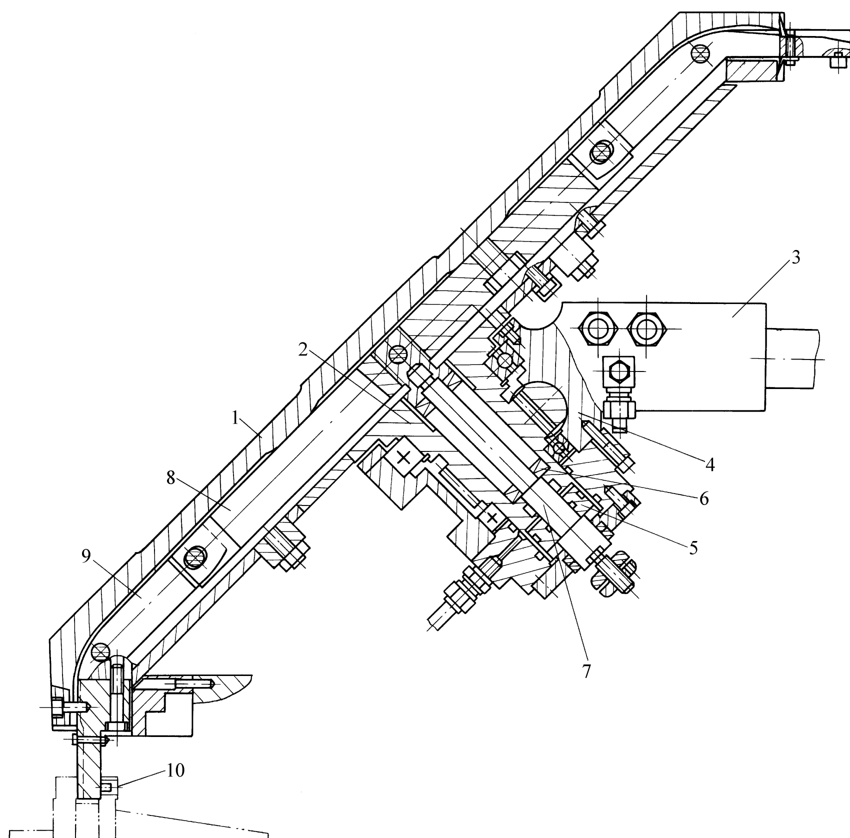



图3-82　机械手的结构图

1—手臂　2—回转轴　3—壳体　4—液压缸　5—液压缸
6—碟形弹簧　7—拉杆　8—杠杆　9—活动爪　10—销子

接口以自动或手动方式输入数控单元并在CRT字符显示器上显示。在系统运行时，还可通过CRT进行数控状态监控、报警等。

该系统备有RS232C、FACIT4070、ASR33三种输入/输出接口。除了使用8单元黑色控制纸带作为输入控制介质外，也能使用磁泡存储器存储数据和零件加工程序。最大存储容量达320m控制纸带长的信息。能够将主程序、子程序、用户宏功能主体等记忆到存储器中，能够任意调出并执行。由于磁泡存储器是采用磁性原理进行记忆的，所以无需备用电源在失电时去保护存储的数据和程序。

FANUC6系统带有内装式可编程序控制器（PC），它能根据指令要求输出主运动变速、刀具选择交换、辅助装置动作等指令信号，经必要的编译、逻辑判断、功率放大后直接驱动相应的电器部件、液压和机械执行装置，完成指令所规定的动作，有的开关信号也经它送至数控单元进行处理。机床主轴由宽调速直流电动机驱动、主轴速度控制器和测速发电机构成转速负反馈速度控制，能根据输出的主轴转速指令进行无级调速。能实现恒线速切削，通过位置编码器检测，还能在机床换刀时使主轴进行准停。

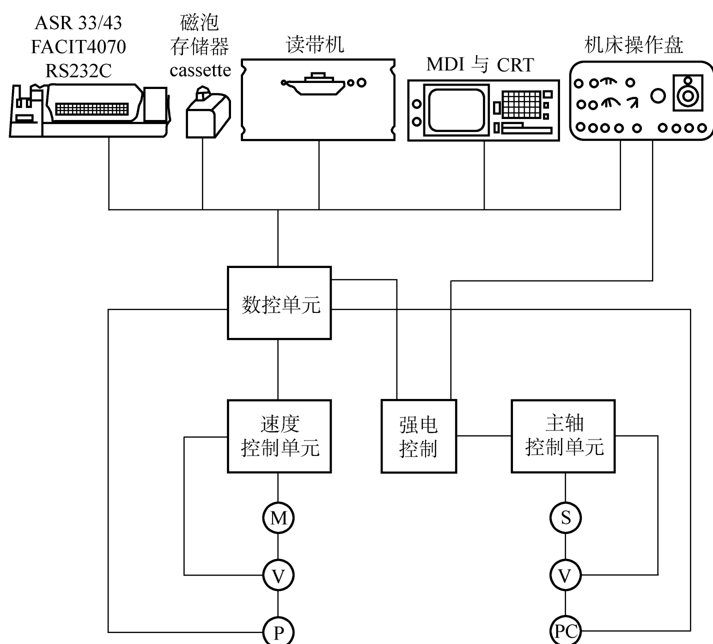



图 3-83　FANUC 系统的结构

M—进给伺服电动机　V—速度检测器　S—主轴电动机　PC—准停位置传感器

P—位置检测器（脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器、磁尺）

每个进给坐标轴的控制都配有一套伺服驱动系统。进给驱动电动机采用直流伺服电动机，应用 PWM 晶体管脉宽调速电路，位置检测元件除了可采用脉冲编码器外，还可采用旋转变压器、同步感应器、光栅等，构成全闭环控制系统。该系统的位置控制框图如图 3-84 所示。CPU 输出的位置指令经过专用大规模集成电路位置控制芯片 MB8739 处理后，送往 D/A 转换器，再经速度控制单元控制电动机运动。电动机轴上装有脉冲编码器，随着电动机转动产生系列脉冲。该脉冲经接收器后反馈到 HB8739，然后将其分为两路，一路作为位置量的反馈，一路经频率/电压（F/V）变换作为速度量的反馈信号送往速度控制单元。

图 3-84 中，误差寄存器寄存将来自数字积分插补器的指令值与来自鉴相器的实际位置反馈值比较后的位置误差；位置增益是对位置误差乘以一定的比例系数，它是用来调整整个位置伺服系统的开环增益 $K_v$ 的；PWM 是脉宽调制电路，将位置误差调制成某一固定频率且宽度与误差值成正比的矩形脉冲波，经 PWM 后，输出误差指令 FC-MD；偏移补偿是用于在无位置指令输出时，自动补偿坐标轴可能出现的移动；鉴相器用来处理脉冲编码器的反馈信号；DMR 是实际位移值的倍乘系数。用于编程的指令单位与实际机床移动单位可能不一致时，用 DMR 进行调整，使其一致，以便进行比较。DMR 的值由软件根据实际机床的参数设定；基准计数器用于机床坐标回到参考点时，产生零点信号。

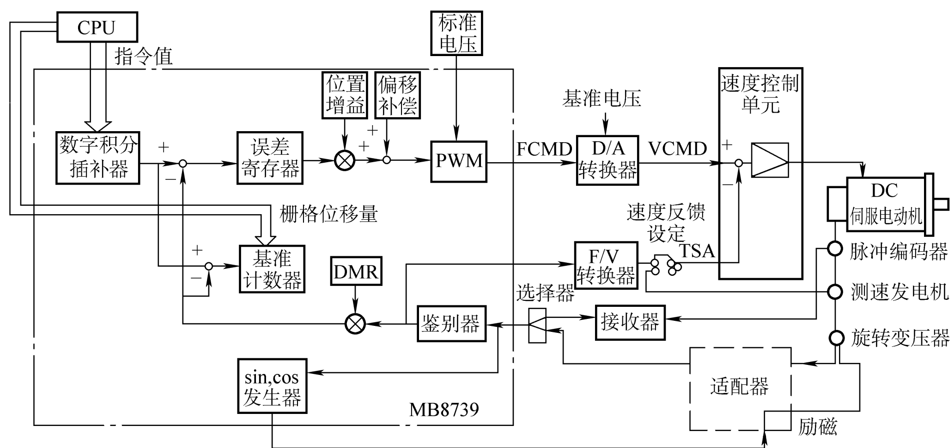



图 3-84　位置控制框图

## 3.9.4　数控五轴联动激光加工机

该机床集激光、机械、传感器和自动检测、信息处理、微机自动控制和伺服驱动等多项技术于一体，能完成平面和三维曲面的激光加工。主要用于汽车制造厂的车身模具制造维修中的热处理与表面熔覆及对汽车大型覆盖件和梁类零件进行激光切割与焊接。

**1. 系统构成**

如图 3-85 所示，该机床由主机 1、激光器 2、电器控制系统 3 等主要部件组成。主要技术参数见表 3-22。

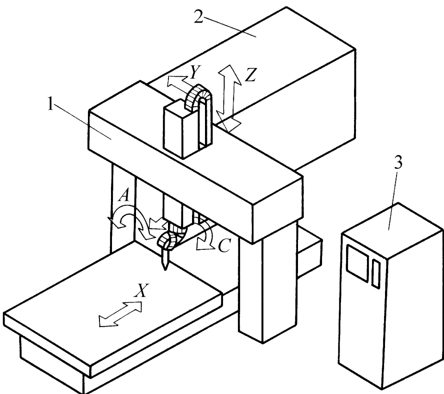



图 3-85　多用途数控五轴联动激光加工机
1—主机　2—激光器　3—电器控制系统

**2. 工作原理**

（1）平面与三维曲面的激光热处理和表面熔覆　由于热处理和熔覆的零件较重，一般直接装在工作台上，激光器输出可达 5 kW、直径 $\phi$37mm 的高阶模激光束。如图 3-86 所示，激光束通过反射镜 1、2 进入 $Y$ 轴方向，经过反射镜 3 后沿 $Z$ 轴方向传到反射镜 4 后，经聚焦头上的曲面反射镜 5 聚焦到工件 9 表面，光头保持垂直，沿 $Y$ 轴移动，工作台 8 沿 $X$ 轴可进行平面加工。如果加上 $Z$、$C$、$A$ 轴的运动就能进行三维轴面的热处理与熔覆。

**表 3-22　主要技术参数**

| | |
|---|---|
| 工作台尺寸（长 × 宽）/mm | 3000 × 1500 |
| 空间加工范围（长 × 宽 × 高）/mm | 3000 × 1500 × 600 |
| 工作台最大承重/kg | 10000 |

（续）

| | | |
|---|---|---|
| 切割速度/（m/min） | | 0～5 |
| 快速移动速度 | $X$ 轴 | 8m/min |
| | $Y$ 轴 | |
| | $Z$ 轴 | |
| | $A$ 轴 | 10r/min |
| | $C$ 轴 | |
| 工作行程/mm | $X$ 轴 | 3000 |
| | $Y$ 轴 | 1500 |
| | $Z$ 轴 | 800 |
| | $A$ 轴 | ±90° |
| | $C$ 轴 | ±270° |
| 激光器功率/kW | 高阶模 | 5 |
| | 低阶模 | 3 |
| 激光光束直径/mm | 高阶模 | $\phi$37 |
| | 低阶模 | $\phi$20 |

（2）激光切割与焊接　如图 3-86 所示，机床换上带聚焦透镜的聚焦光头，激光器输出可达 3kW、直径中 $\phi$25mm 的低阶模激光光束，通过反射镜 6 反射，透镜 7 聚焦到工件表面，机床五轴联动则可进行三维曲面的切割与焊接。

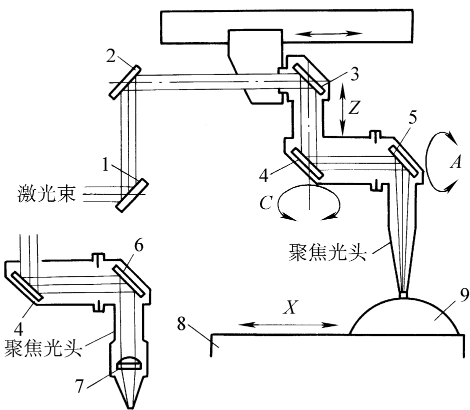



图 3-86　激光加工机外光路示意图

1，2，3，4，6—反射镜　5—曲面反射镜

7—透镜　8—工作台　9—工件

（3）激光切割焦点位置自动测量与控制　为了保证激光切割的质量，通常要自动检测激光焦点的位置，且自动控制光头移动使焦点相对工作表面保持在一定位置上。本系统采用与数控系统一体化的测控结构，使控制精度提高。

焦点位置自动控制是把机床的三个直线运动坐标轴作为执行机构，当自动检测装置测出焦点位置的变化时，数控系统立即控制 $X$、$Y$、$Z$ 三个坐标轴作相应的移动，使焦点自动进行跟踪，始终保证其与工作表面的相对距离不变。

（4）三维曲面激光切割的示教录返　三维曲面的激光切割，由于被加工对象形状复杂，难以建立精确的数学模型，通常采用本系统具有的示教录返装置进行编程。加工前，操作人员先根据零件的工艺要求，在加工对象上画出加工轨迹。然后通过示教装置操纵各个坐标轴移动，使激光头的喷嘴按实际切割的需要，沿加工轨迹预走，找

到若干个点，让数控系统记录这些示教点的空间坐标，再采用特殊的插补算法生成零件加工程序，使机床能按预定空间轨迹运动。

（5）CAD/CAM 软件系统　为了便于进行二维平面切割，机床还配备了 CAD/CAM 软件系统，具有图文设计、汉字矢量化处理、优化排样、NC 程序自动生成和加工过程仿真等功能。

**3. 系统设计**

（1）机械传动系统设计　机械传动系统要求高精度、高速度、惯性小、运动平稳、工作可靠。这不仅是机械传动和结构本身的问题，而且应通过控制装置，使机械传动部分与伺服电动机的动态性能相匹配。

对于伺服机械传动系统，应达到较高的机械固有频率、高刚度、合适的阻尼、线性的传递性能、小惯量等。这些都是保证伺服系统具有良好的伺服特性（精度、快速响应和稳定性）所必须的。

激光加工机的 *X*、*Y*、*Z*、*A*、*C* 五个数控轴的机械传动系统的设计是该机床设计的关键。

*X*、*Y*、*Z* 三个直线运动轴行程均小于 4m，因此选择滚珠丝杠副传动。*X*、*Y*、*Z* 三个直线运动轴均采用直线滚动导轨副。*C*、*A* 两个转动轴选择蜗轮蜗杆传动。

传动机构输入轴与伺服电动机可直接用弹性联轴器连接。

（2）电气控制系统设计　电气控制系统由五轴联动计算机数控（CNC）和伺服驱

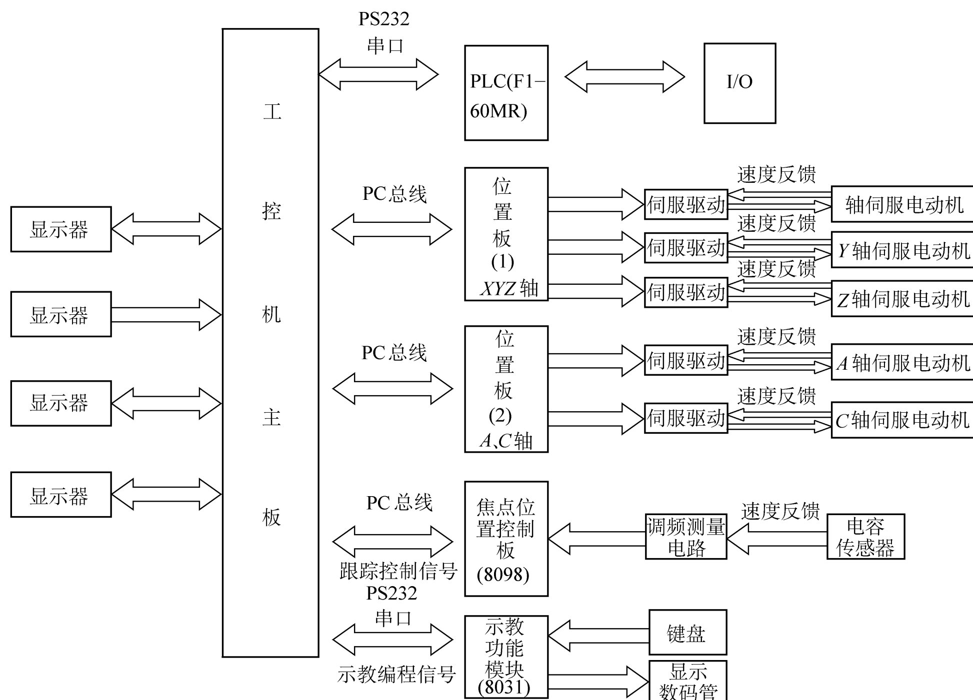



图 3-87　电气控制系统的构成

动单元、系统逻辑控制单元、激光焦点位置控制单元以及示教单元组成，如图3-87所示。

**4. 数控系统**

CNC系统是激光加工机的控制中枢，主要完成五轴联动的加工运动轨迹和各个单元的协调。CNC软件采用模块化设计，结构化编程，便于维护与扩展。

1）CNC系统的基本硬件采用研华AWS-860一体化工业控制机，由10槽无源PC总线母板、基于PC总线的PCA-6136 CPU卡、ET4000显示卡、10in（1in = 0.0254m）高分辨率彩色显示器、230W开关电源和PCD8931电子盘卡及电子盘组成。

2）工业控制机通过RS232串行总线接口与PLC逻辑控制单元和示教单元相连；通过PC线与两块位置控制板相连。

3）CNC系统的位置控制采用Tecnology80公司基于PC总线的位置控制板。外接的伺服驱动单元采用Fagor公司的交流伺服驱动器及伺服电动机。位置控制板1控制*X*、*Y*、*Z*轴伺服驱动单元，位置控制板2控制*A*、*C*轴伺服驱动单元。图3-88为*X*轴位控板和伺服驱动单元接线示意，其余*Y*、*Z*、*A*、*C*数控驱动轴与此类似。

4）系统的逻辑控制单元采用三菱公司的F1-60MR外装式PLC，利用PLC的I/O口输入行程开关、压力继电器和工业控制机及各单元的逻辑控制信号，输出控制电磁阀、指示灯及各单元的逻辑动作。

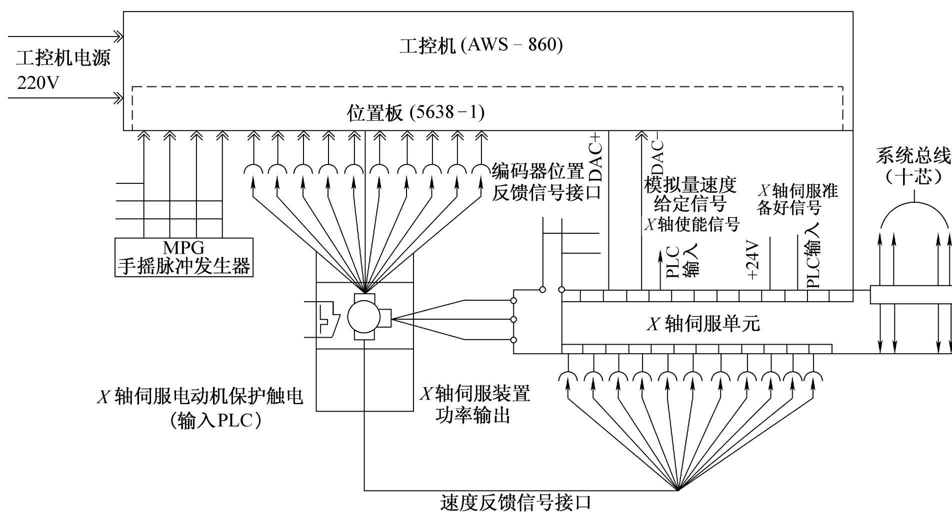



图3-88　*X*轴位控板和伺服驱动单元接线示意图

**5. 检测系统**

在激光切割加工中，为了使切口处获得最大的功率密度，保证切割质量，激光焦点一般应位于被加工工件表面以下板厚约1/3处。由于工件存在表面起伏误差，在加工过程中，聚焦头喷嘴与工件之间的间隙将会有较大的变化，因此为了对激光焦点位置进行有效的控制，必须先对焦点位置自动检测。在实际检测过程中，焦点的位置是根据聚焦头喷嘴与工件之间的间隙决定的。

焦点位置检测的要求是激光焦点位置控制精度指标为 ±0.2mm，检测误差最多不能超过 ±0.1mm。检测方法有接触式和非接触式两类。

(1) 电容传感器非接触式检测电路　电容传感器可动测量电极与辅助气喷嘴采用一体化结构，如图 3-89 所示。喷嘴安装于聚焦头端部，与机床的金属部分绝缘，并通过引线与测量电路相联。

两个极板间电容量为

$$C = \xi S/h$$

式中　$\xi$——空气介电常数（一般为 1）；

$S$——极板相对有效面积；

$h$——两极板间距离。

上式所测到的电容正好反映两极板间距离 $h$。电容传感器的电容值十分微小，数量级一般在 $10^{-12} \sim 10^{-11}$F 之间，必须借助于测量电路和处理电路，将其转换为相应的电压，电流或频率信号，才能被微机控制系统接受。

电容传感器测量电路，采用运算放大器式电路，如图 3-90 所示，利用一个标准的高频正弦信号 $U_i$，对由运算放大器构成的电容网络进行激励，经过整流后，得到电压输出 $U_o$。

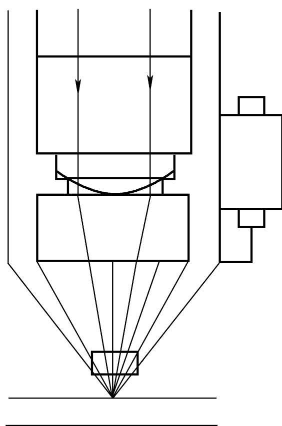


图 3-89　电容传感器原理图

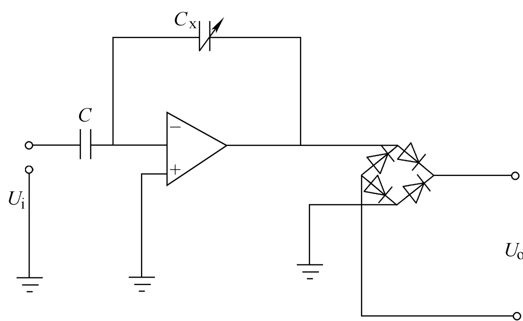



图 3-90　运算放大器测量电路

焦点位置检测系统采用如图 3-91 所示的数字外差式调频测量电路，其原理是将电容传感作为调频振荡器谐振电路的一部分，当因聚焦头喷嘴间隙发生变化引起电容量改变时，振荡频率也随着改变，振荡 2s 的输出频率即可反映出聚焦头喷嘴与工件的实际间隙。

通过分析可以发现，在激光切割过程中，如果喷嘴传感器与工件发生接触，调频振荡器的输出频率极低，甚至停止振荡，经过数字混频后得一个频率很高的差频信号，超过了微机系统的频率采样范围，因此必须对数字差频信号进行限频和脉冲宽度调整，将最高频率限制在 50kHz 左右，并且脉冲高低电平不少于 0.2μs，通过限频后的中频数字信号经过光电耦合器送入微机系统，由微机进行计数采样。经过实测，间隙与检测

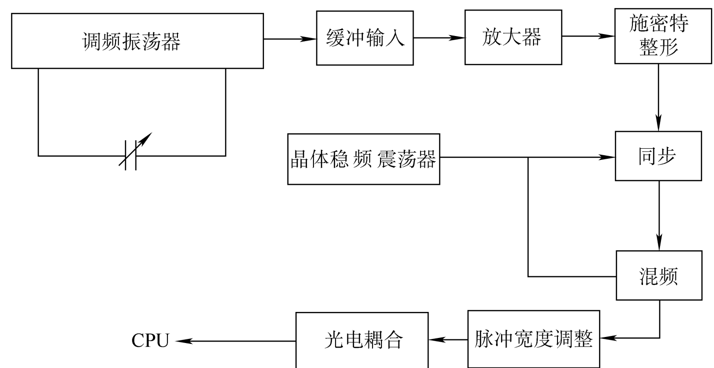



图 3-91　外差式调频检测电路

系统输出频率之间关系如图 3-92 所示。

可以看出，在间隙较大的区段，曲线较为平坦只要能够保证在大间隙检测时有足够的检测分辨率，在整个检测范围内，分辨率是不成问题的。大间隙检测的分辨率可以进行如下估算：间隙 $\delta=4.0\text{mm}$ 时，频率 $f=62$ kHz，而 $\delta=3.0\text{mm}$ 时，$f=74\text{kHz}$，如果频率量采样时间为 5ms，计数精度为 0.5 脉冲（8098 方式），则采样值的一个数字量对应的位移量约为 0.008 mm。可见电容非接触式检测系统即使在进行大间隙测量时，分辨率也高于 0.01 mm，这完全可以满足激光焦点位置检测和控制的要求。

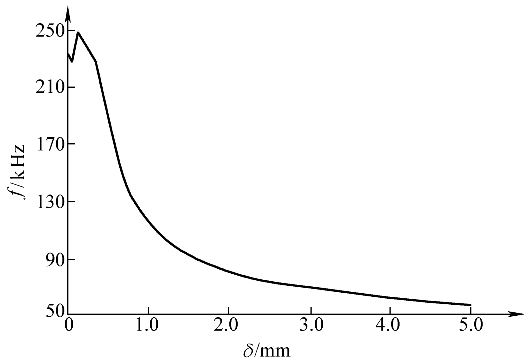



图 3-92　检测系统的输出特性

（2）差动变压器接触式检测电路　差动变压器将被测位移量转换为传感器的互感变化，使次级线圈感应电压也产生相应变化。由于传感器作成差动形式，故称为差动变压器。其结构形式较多，其中Ⅱ形或 E 形测量范围较窄，一般用作几微米至几百微米的机械位移测量；而螺管形差动变压器可测量一毫米至上百毫米的位移范围，应用十分广泛。但由于是接触式检测，这种系统仅在平面切割的激光机床中使用。螺管形差动变压器按线圈排列方式可分为二段形、三段形和多段形几种，图 3-93 为三段形结构图。线圈由初级线圈 P 和次级线圈

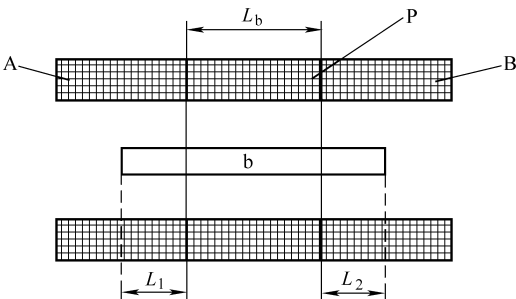



图 3-93　三段形螺线管差动变压器结构图

A，B—次级线圈　P—初级线圈　b—铁心

A、B 组成，它们绕在由绝缘材料制成的圆柱形骨架上，并被密封于壳体内部，线圈中心插入活动圆柱形铁芯 b。差动变压器的电气连接如图 3-94 所示。次级线圈 A 和 B 反极性串联，当初级线圈户加上一定的交流电压 $V_p$ 时，就会在次级线圈中产生感应电压 $V_A$ 与 $V_B$。

$$V_A = K(2L_1 + L_b)L_1^2$$
$$V_B = K(2L_2 + L_b)L_2^2$$

式中 $K$ 为常数，$L_1$，$L_2$ 为铁心伸入两次级线圈的长度，$L_b$ 为初级线圈长度。

图 3-94 中 $V_s = V_A - V_B = k_1 x\ (1 - k_2 x^2)$，其中 $x = (L_1 - L_2)/2$ 为铁心位移量，$k_1$、$k_2$ 为常数，可见当 $x$ 远小于铁心长度时，$V_s \approx k_1 x$ 与铁心的轴向位移成比例。

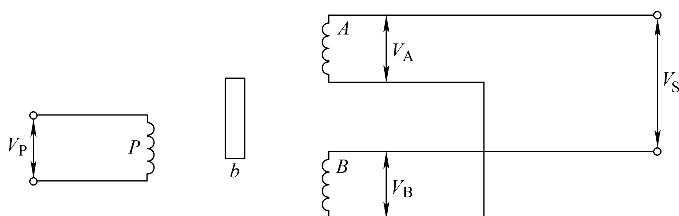



图 3-94　差动变压器电气连接图

当铁心处于中心位置时，$V_A = V_B$，则 $V_s = 0$；当铁心朝 $A$ 运动时，$V_A > V_B$；反之，$V_A < V_B$。随着铁心偏离中心位置，$V_s$ 逐渐加大。这样差动变压器通过 $V_A$ 和 $V_B$ 的变化反映出铁心位移的变化。

当铁心位置由中心向上或向下移动时，$V_s$ 的相位变化为 180°，如图 3-95b 所示。在理想条件下，铁心在中心平衡位置时 $V_s$ 为 0，实际上由于制造及外界原因，$V_s$ 并不为 0，而是为 $V_o$，称为零位电压。实际的差动变压器输出特性曲线如图 3-95a 中虚线所示，因传感器精度不同，零位电压通常为零点几毫伏到几十毫伏不等，其基波相位与 $V_s$ 差 90°，同时还含有二次、三次为主的谐波成分。零位电位传感器输出特性在零位附近不灵敏，输出信号不准确。如果采用补偿方法则有可能对输出电度和相位有影响，需从原理上采取措施予以解决。

由于激光头与工件间隙一般在 0.8 ~ 3mm 之间，为提高线性度，传感器检测范围应留有余量，故选择名义量程为 ±10mm，实际只用到了 ±2.5 mm。为保证导杆能与工件时刻保持紧密接触而不留机械间隙，并且运动起来伸缩自如而不致卡死，选择铁心通过复位弹簧与壳体体相连的导向回弹式结构。其基本参数为基本误差 ±0.1%，线性度误差 ±0.1%，回差 0.04%，重复误差 0.04%。

图 3-96 中 AD598 为新型差动变压器信号处理芯片，输出为 ±5V 直流电压，它经过 LM310 射极跟随器隔离后将首先由测量放大器 AD620 进行电平转换为 0 ~ 10V 输出，以满足后续电压/频率转换芯片 AD654 的输入要求。AD654 将此范围电压转换为与电压成比例变化的 0 ~ 160kHz 的方波信号，通过 6N137 光电隔离器进入 8098 单片机的计数脉冲输入口。

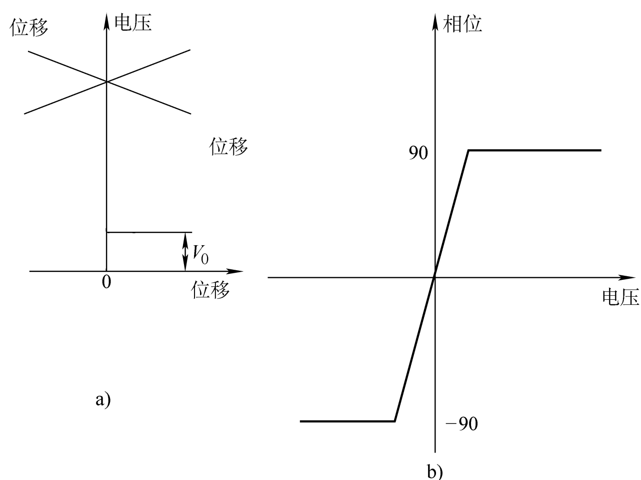



图 3-95　差动变压器输出特性曲线

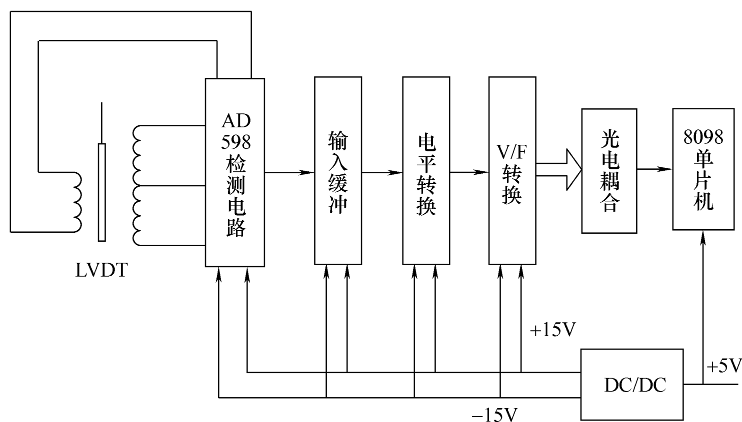



图 3-96　LVDT 检测电路图

### 3.9.5　HCD300K 型数控电火花加工机床

汉川机床厂生产的 HCD300K 型精密数控电火花工机床是一种中等规格的高精密特种加工机床，采用紫铜、石墨、钢、铜钨合金等电极材料，能对碳素钢、工具钢、合金钢、淬火钢、硬质合金及其他高硬度金属材料进行放电加工，可加工冲压模（落料模、复合模、级进模等）、型腔模（精锻模、压注模、压延模、注塑模等）及各种零件的坐标孔及复杂的异形曲面，还可以加工 0.1mm 以上的小孔和 0.2mm 的窄缝，广泛应用于电动机、仪表、仪器、汽车、航空、航天、轻工、军工、模具等行业。

**1. 机床主要装置**

（1）床身和立柱　床身和立柱是一个基础结构，由它确保电极与工作台、工件之间的相互位置。它们精度的高低对加工有直接的影响。因此，不但床身和立柱的结构应该合理，有较高的刚度，能承受主轴负重和运动部件突然加速运动的惯性力，还应

能减小温度变化引起的变形，经过时效处理消除内应力，使其日久不会变形。

HCD300K 机床的床身为刚性很高的箱形结构，采用三点主支撑，保证导轨精度不受地基的影响。为了提高床身导轨精度的保持性，在床身下还有两个辅助支撑。床身是整个机床的基础，其上面安装鞍座和工作台，用于支撑工作台的纵、横运动。立柱固定在床身的结合面上，在立柱的前端面安装着主轴箱，如图 3-97 所示。

（2）工作台　工作台主要用来支撑和装夹工件。在实际加工中，通过转动纵横向丝杆来改变电极与工作台的相对位置。工作台上还装有工作液箱，用以容纳工作液，使电极和被加工件浸泡在工作液里，起到冷却、排屑作用。工作台是操作者在装夹找正时经常移动的部件，以手动方式移动上下拖板，改变工作台纵横向位置，达到电极与被加工件间所要求的相对位置。工作台的种类可分为普通工作台、精密工作台。目前在国内已应用精密滚珠丝杠、滚动直线导轨和高性能伺服电动机等结构，以满足精密模具的加工。



图 3-97　HCD300K 型精密数控电火花加工机床

HCD300K 机床的工作台和鞍座的导轨均采用高品质直线滚动导轨，工作台的纵横向运动采用交流伺服电动机通过联轴节直接驱动滚珠丝杠副来完成。工作台上有三条 T 形槽，用于夹紧副工作台或工件。

（3）主轴头　主轴头是电火花穿孔成形加工机床的一个关键部件，它的结构是由伺服进给机构、导向和防扭机构、辅助机构三部分组成。它控制工件与工具电极之间的放电间隙。

主轴头的结构和工作性能直接影响加工的工艺指标，如生产率、几何精度及表面粗糙度，因此主轴头应具有一定的轴向和侧向刚度及精度，足够的进给和回升速度；主轴运动的直线性和防扭转性能好，灵敏度要高，无爬行现象；不同的机床要具备合理的承载电极质量的能力。

图 3-98 所示为 HCD300K 机床的主轴重锤平衡系统。该平衡系统的重锤 1 经钢丝绳 2、滑轮 6 与主轴 3 的上端相连接，滑轮轴 4 和 7 及单列向心球轴承 5 是用来安装滑轮的支承件。主轴重锤平衡系统用于调整主轴的下垂重力，有利于提高主轴的运动精度，克服主轴头重力对进给精度的影响。

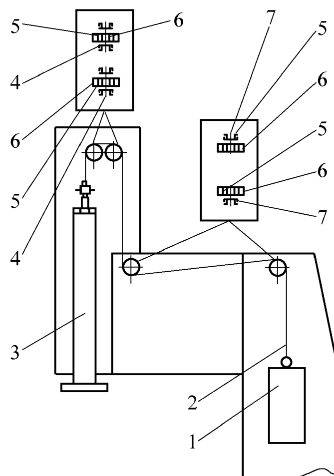



图 3-98　HCD300K 机床的主轴重锤平衡系统

1—重锤　2—钢丝绳　3—主轴　4，7—滑轮轴　5—单列向心球轴承　6—滑轮

**2. 主要技术参数**

主要规格及技术参数见表 3-23。

**表 3-23　HCD300K 机床的主要规格及技术参数**

| | | |
|---|---|---|
| 工作台 | 工作台面积（长×宽）/mm | 630×350 |
| | 工作台最大行程　纵向（$X$）/mm<br>横向（$Y$）/mm | 300<br>200 |
| | 工作台允许承载最大质量/kg | 300 |
| 工作液槽 | 内部尺寸（长×宽×高）/mm | 1070×550×340 |
| | 容量/L | 200 |
| 主轴 | 主轴垂直行程（$Z$）/mm | 250 |
| | 主轴端面距工作台面最大距离/mm | ≥510 |
| | 允许最大电极质量/kg | 50 |
| | 电极连接板尺寸/mm | 124×180 |
| | 坐标定位精度 | $X$：0.014　$Y$：0.011 |
| 油箱 | 容量/L | 30 |
| | 液泵流量/L/mm | 60 |
| | 外形尺寸（长×宽×高）/mm | 1120×800×520 |
| 效率 | 最大加工电流/A | 50 |
| | 最大加工生产率/（$mm^3$/min） | 400 |
| | 最佳加工表面粗糙度/μm | ≤0.3 |
| | 最低电极损耗 | ≤0.3% |
| 电气容量 | 脉冲电源柜输入功率/kW | 7 |
| | 主机外形尺寸（长×宽×高）/mm | 1335×1110×2213 |
| | 机床质量/kg | 1600 |
| | 整机噪声/dB | ≤70 |

**3. 主轴头伺服进给系统**

HCD300K 机床的主轴伺服系统采用交流伺服电动机，通过圆弧同步齿形带减速及滚珠丝杠副传动，驱动主轴作上下伺服运动。主轴箱整体固定在立柱上，使主轴的精度保持性好，拆装运输方便。当切断伺服主回路电源时，电磁制动器将同时断电，使得与电磁制动器直联的滚珠丝杠副停转。

电火花加工机床主轴伺服进给系统的工作原理图如图 3-99 所示。该伺服进给系统由 DC（或 AC）伺服电动机，经离合器和滚珠丝杠螺母副，驱动主轴箱沿立柱导轨作垂直方向的升降移动，以改变工具电极和工件之间的间隙。伺服控制单元主回路通电后，电磁制动器松开，伺服电动机旋转，主轴上下移动，从而实现放电加工的伺服过程。主轴处在任何位置当切断伺服主回路电源时，伺服电动机和电磁制动器将同时断电，在弹簧力的作用下，制动器内的摩擦片压紧，使得滚珠丝杠不能自由转动，主轴

箱不会因自重而下降。

从图 3-99 中可见，主轴伺服进给系统为闭环控制系统。用光栅尺直接测量主轴的直线位移唯一，将测量到的主轴头实际位移值反馈到数控装置中，与输入的指令位移值进行比较，用差值对主轴头进行控制，最终实现主轴头的精确运动与定位。

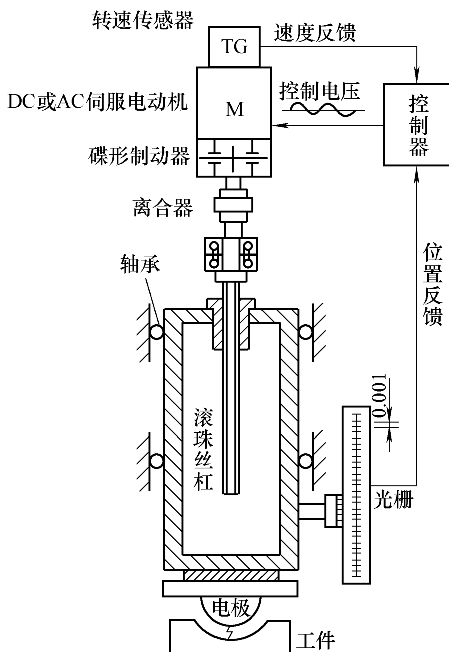



图 3-99　电火花加工机床主轴伺服进给系统原理图

**4. 机床性能特点**

1）三轴数控。

2）机床主轴采用方形结构，具有刚性好，抗扭转性能高的特点，主轴用精密直线滚动导轨块，精密滚珠丝杠传动，灵敏度高，伺服性能好，加工稳定。

3）机床伺服坐标采用精密滚珠丝杠副作为坐标定位元件，配以高品质的直线滚动导轨，定位精度高。

4）机床除了具有电极夹头及安装工件用的必备附件外，还备有用户选用附件及用户特殊选用附件，增强了机床的使用功能，扩大了机床的使用范围。

5）机床的工作液槽采用双开门结构，操作空间大，方便工件的装卸；简捷的管路可快速地上油或放油，节约辅助时间，提高工作效率。

## 3.9.6　NCUT-ME30 型数控雕铣机

数控雕铣机是数控技术与雕刻、铣削工艺相结合的产物，是一种多用的数控机床，与普通数控机床类似，数控雕铣机通过数控系统根据加工程序代码控制雕铣机动作，实现雕刻、铣削加工的自动化。

机床本体采用三轴联动、精密丝杠滑台、高速变频电主轴、光栅尺反馈等，符合有关安全标准。控制软件是基于 PC 或 IPC + 固高 GE300SV 运动控制卡组成的硬件平台和 WinXP + VC6.0 组成的软件平台构建的，该软件采用模块化和面向对象的设计思想，具有良好的开放性、可操作性和易维护性，实现了对 NCUT-ME30 型数控雕铣机的实际控制操作。

**1. 雕铣机的硬件结构**

机床有关参数如表 3-24 所示。

**2. 雕铣机电气结构**

雕铣机电气结构简图如图 3-100 所示。

本机电源采用三相 AC ~220V 供电，首先通过 NFB（非熔丝断路器）来保护电源

线，过电流时切断电路；接着要用NF（噪声滤波器）防止外部杂波进入电源线，并减轻伺服电动机产生的杂波对外界的干扰；MC（磁力接触器）用来接通/断开伺服电动机的主电源，一般磁力接触器应于浪涌吸收器联用；还要用L（电抗器）来减少主电源中的谐波。

表3-24 机床主要参数

| | | | |
|---|---|---|---|
| 机床外形尺寸/mm | 1030×970×1480 | 机床重量/kg | 300 |
| 加工范围/mm | 250×350 | 最大功率/kW | 2 |
| 定位精度/mm | ±0.01 | 重复定位精度/mm | ±0.005 |
| 最大移动速度/mm/s | 250 | 铣削速度/m/min | 1~2 |
| 每分钟钻孔数量 | 80~150（个） | 钻孔直径范围 | ϕ0.3~6mm |
| 主轴电机/（r/min） | 42000 | 工作电压 | AC220±22，50Hz |
| 压缩空气需求/MPa | 0.7 | 换刀方式 | 手动 |

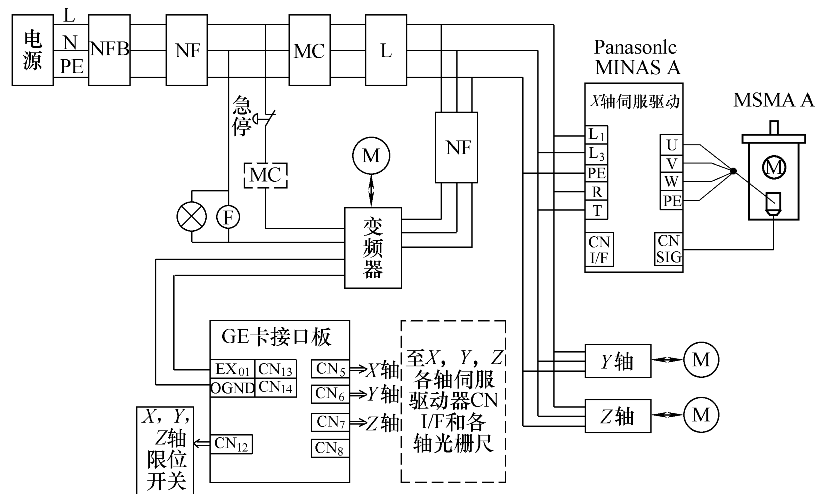



图3-100 雕刻机电气结构简图

### 3. 雕铣机数控系统

本机数控系统采用PC机为硬件平台的数控系统，由开放体系结构运动控制器加上PC机构成，即“PC+NC”型结构，能够充分保证系统性能，软件的通用性强，编程处理灵活。PC为通用个人计算机，作上位机，由最终用户通过人机交互界面进行操作控制。运动控制卡采用的是基于数字信号处理器DSP和大规模逻辑可编程器件FPGA为基础的固高GE300SVPCI卡，作下位机。基于PC总线的运动控制器是整个控制系统的核心，它接受来自上位PC机的应用程序指令，按照设定的运动模式，完成相应的实时运动规划（多轴插补协调运动）和向驱动器发出相应的运动指令。这样将PC机的信息处理能力和开放式的特点与运动控制卡的运动轨迹控制能力有机地结合在一起，具有信息处理能力强、开放程度高、运动轨迹控制准确、通用性好的特点，而且还可以利用第三方软件资源完成用户应用程序的开发，将生成的应用程序指令通过PC总线

传输给运动控制器。所有这些还很大程度上提高了现有加工制造的精度、柔性，缩短新产品的研发周期和应付市场需求的能力。雕铣机数控系统的原理结构框图如图 3-101 所示。

（1）伺服系统　伺服系统采用 Panasonic（松下）MINAS A 系列 MSDA043A1A 2 型交流伺服驱动器和与其匹配的 MSMA042A 型伺服电动机，增量式编码器 2500P/r，11 线。机床还采用了高性能的变频器来控制主轴电动机，速度最高可以达 42000r/min，大大提高其切削性能。每轴都配有正负限位开关和精密光栅尺，用以提高机床的控制精度和安全性。图 3-102 为 Panasonic MSDA043A1A 2 型伺服驱动器与固高 GE 卡接口板的连接图和有关限位信号的连接图。

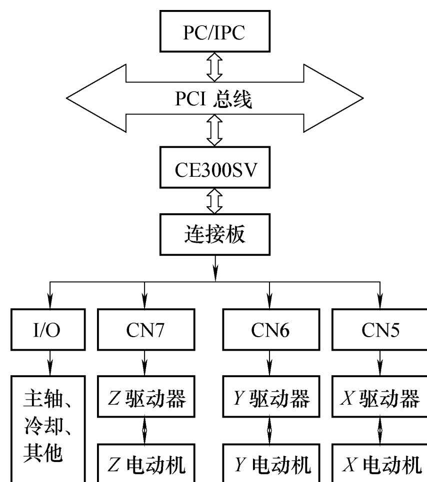



图 3-101　数控系统原理框图

（2）运动控制器　深圳固高公司生产的 GT&GE 系列运动控制器，其核心由 ADSP2181 数字信号处理器和 FPGA 组成，可以实现多轴协调运动、高速点位运动和高性能的控制计算。它应用领域广泛，适用于机器人、数控机床、木工机械、印刷机械、装配生产线、电子加工设备、激光加工设备及 PCB 钻铣设备等。

GT&GE 系列运功控制器以 IBM-PC 及其兼容机为主机，提供标准的 ISA 总线和 PCI 总线两个系列的产品。作为选件，在任何一款产品上可以提供 RS-232 串行通信和

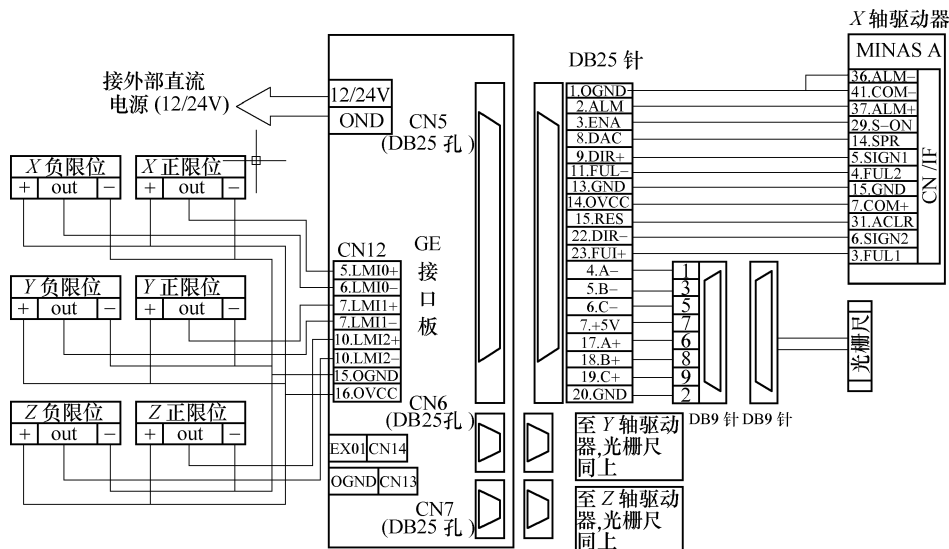



图 3-102　伺服驱动器和限位信号与接口板连线图

PC104 通信接口，方便用户配置系统。运动控制器提供 C 语言函数库和 Windows 动态链接库，实现复杂的控制功能。用户能够将这些控制函数与自己控制系统所需的数据处理、界面显示、用户接口等应用程序模块集成在一齐，建造符合特定应用要求的控制系统，以适应各种应用领域的要求。

本机采用的 GE300SVPCI 卡是经济型运动控制器，主要应用于高速高精连续轨迹运动场合。该卡可控制 3 个伺服/步进轴，实现三轴联动的连续轨迹插补运动。伺服采样周期为 200μs（用于管理速度规划，不影响插补精度）。运动方式有直线插补、圆弧插补、手脉输入跟随（可指定任意轴跟随手脉速度和位置变化），插补速度可稳定工作在 256kHz，圆弧插补的径向误差在 ±0.5pulse 之内；用户存储区（64KB ROM，512KB SRAM），底层循环程序缓冲区（8KB）用以提高通讯效率。PID（比例—积分—微分）数字滤波器，带速度和加速度前馈，带积分限值、偏差补偿和低通滤波器。多段预处理功能，合理协调轨迹运动的速度和精度，硬件捕获原点开关和编码器 Index 信号，实现高精高速位置锁存，具有良好的重复定位精度。控制输入输出：输出有 3 路 16 位分辨率模拟电压输出信号（±10V）或 3 路脉冲输出信号（256kHz）；输入有 4 路编码器输入，包括 3 路轴编码器、1 路辅助编码器，采样频率 4MHz。光电隔离的 16 路通用数字输入和 16 路通用数字输出。GE300SV 卡的所有功能能够满足本雕铣机所要达到的设计要求。

**4. 雕铣机的数控系统软件**

本系统软件在 Windows XP 环境下基于 VC ++ 6.0 MFC 和 GE 系列运动控制器提供的 Windows 下动态链接库进行开发，软件采用模块化和面向对象的程序设计思想，应用 SDI（单文档视图）结构，构建了一个界面友好的功能强大的数控系统软件。所建立的数控系统的基本框架结构和基本功能模块划分如图 3-103 所示。

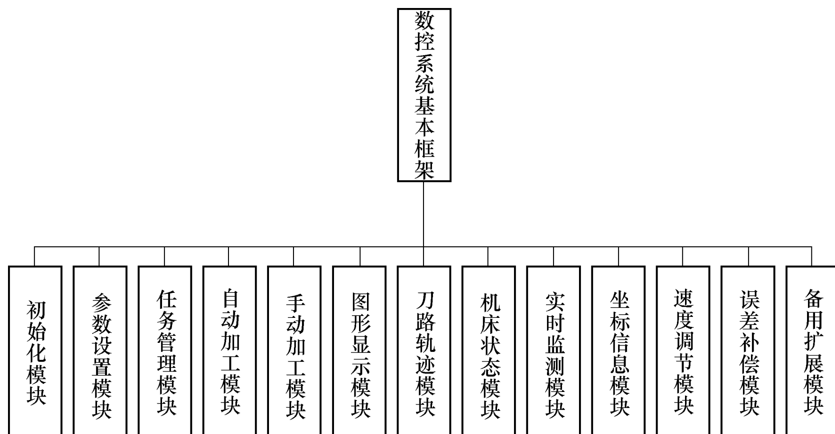



图 3-103　数控系统的基本框架结构和基本功能模块划分

具体实现的功能包括：①系统的初始化预处理，包括卡的初始化和各运动轴的初始化；②工作方式的选择，包括自动加工、手动加工和模拟加工；③机械坐标、工件坐标、进给速度、加工时间和执行数控程序段号等实时显示；④刀路轨迹图形跟踪显

示与三维预览，数控加工程序的分步显示与译码等；⑤机床和控制卡的状态监控，⑥系统在线诊断和 PID 参数设置等功能。

**5. 应用**

该雕铣机整机速度快，精度高、噪声小、稳定性好。标配数控系统控制软件为简体中文版，人机界面友好，操作简单，适用于工业模具制造、艺术浮雕加工、个性印章铭牌制作、装饰业、PCB 加工等要求较高的场合。另外，针对高校的教学需求，采用开放的控制系统，通过不同的控制连线和软件控制，可构成半闭环控制、全闭环控制系统，以满足科研、教学和学生实习的要求。

## 3.9.7　虚拟轴机床

虚拟轴机床（Virtual Axis Machine Tool）的出现是从发明数控技术以来在机床工业上最有意义的进步。它作为 21 世纪新一代数控加工设备出现引起了世界各国的广泛关注。

**1. 结构特点和组成**

长期以来，机床设备一直处于一种固定不变的模式，它们通常由床身、立柱、主轴箱和工作台等几个主要部分构成。机床的基本结构一直沿用传统的笛卡尔坐标形式，千“床”一面。因此结构的相似性造成各类机床工作任务单一，变通性很小，灵活性差，已成为当前机床设备存在的主要问题。而现实的生产环境的特点主要体现为新产品不断推出，产品更新换代加速，产品结构越来越复杂。这些复杂产品的空间曲面加工必须采用专用机床进行，但这样的专用机床结构复杂，价格昂贵，其中一些产品属于单件小批量生产，甚至可能只生产一件，企业若添置这样的专用设备，使用率并不高，会造成资源闲置等等。因此希望能有一种柔性的高性能加工机床出现。

如图 3-104 所示的虚拟轴机床实质是机器人与机床这两种技术的集成，它突破了传统机床的工作轴线概念。在原理上按照 stewart 平台并联机器人的运动原理和结构形式进行设计和工作。虚拟轴机床采用六根两两交叉的杆连接起来的上动平台和下定平台这种特殊的结构形式。机床的结构除了各种形式的 stewart 平台外，还包括由杆件组成的多面体框架结构，此类机床也称为并联机床，如图 3-105 所示。伸缩杆长度变化可控制装有主轴头的动平台在空间中的位置和姿态，以满足刀具运动轨迹的要求，实现 6 自由度运动的复杂曲面加工。在虚拟轴机床运动中，实际上是看不到如普通机床运动中的笛卡尔坐标轴，这些坐标轴只是虚拟地存在于控制系统操作之中，这就是虚拟轴机床名称的由来。



图 3-104　虚拟轴机床外观

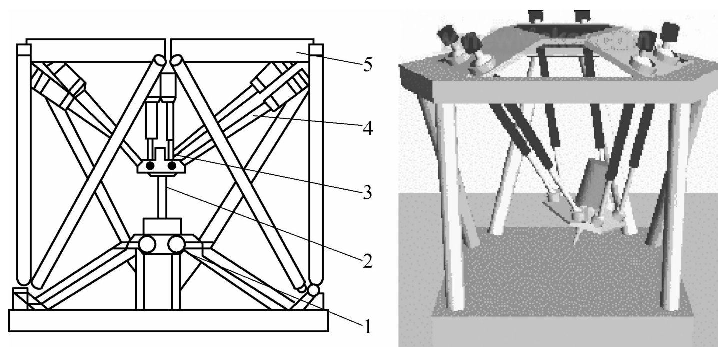



图 3-105　虚拟轴机床结构示意图

1—工作台　2—刀具　3—主轴　4—变长杆　5—框架

**2. 特点**

1）机床结构简单。虚拟轴机床主要由框架和可变长度杆等简单构件组成。对于复杂的曲面加工，无需普通机床 X、Y、Z 三个方向的工作台或刀架的复合运动，只要控制 6 杆长度即可。

2）结构稳定、刚度高。虚拟轴机床采用对称封闭框架结构，受力、受热均匀，主轴平台受力由 6 根杆件分担。每杆受力不大，且只承受拉力或压力，而不承受弯短或扭矩。因此刚度高，稳定性好，在相同自重下具有很高承裁能力。

3）机床动态性能好。虚拟轴机床采用并联结构，容易将电动机及传动部件置于框架上。运动平台上仅安装加工所需的刀具，运动部件的数量少、质量轻，减少了运动负荷，使系统的动态性能得到改善，能够实现更快的动态响应。在高速加工时，并联结构的优点更加明显。

4）机床精度高。虚拟轴机床采用 6 根驱动杆构成。6 个并联的传动链，6 杆长度各自控制，共同确定所需要的刀具的工作位置。机床误差是 6 个轴误差的平均值，而非串联传动机构是各个轴的误差叠加。同时虚拟轴机床可以将所有的测量基准点都置于不可移动的框架结构上，这在传统机床结构中是不可能实现的。

5）机床适应性强。虚拟轴机床加工通过连接刀具的动平台在空间改变位置和姿态实现的，而动平台的运动则是通过调整 6 杆的长度进行控制的。对于不同形状的零件，只要改变各杆的长度就可以实现刀具位姿的变化。因此，对于复杂形状的零件，刀具调整方便，机床适应性强。

6）机床经济性好。虚拟轴机床结构简单，框架和可变长度杆等简单构件易于制造。不需要消耗材料多、重量大的床身式直线导轨，不需要保持导轨正交状态的部件，不需要支撑横向负荷的部件，因而材料消耗少，降低了制造成本。同时，虚拟轴机床的主要部件多为通用件，具有较强的模块化功能，有利于针对不同加工需要进行设备重组。

虚拟轴机床显示出来的上述特点，是由于它采用了不同于传统机床串联机构的并联机构所决定的。串联机构（传统机床）与并联机构（虚拟轴机床）基本持性的对比见表 3-25。由表中数据可知，相对于传统机床，虚拟轴机床尚未全面占优，也存在一

些如机床控制较复杂、机床的工作空间相对于机床历占尺寸较小等缺点。事实上，尽管虚拟轴机床的问世带来了“机床结构的重大革命”，但串联结构的传统机床和并联结构的虚拟轴机床之间不是相互替代的关系，而是对偶、互补的关系。在某些采用串联结构的传统机床所不能涉足的领域，并联机构的虚拟轴机床就可能大显身手。

表 3-25　联机构与串联机构的性能对比

| | 并联机构 | 串联机构 |
|---|---|---|
| 刚性 | 刚性高；刚性相互叠加；轴上只受拉力和压力 | 刚性低；弹性相互叠加；轴上还受到弯矩 |
| 误差 | 各个轴的误差形成平均值 | 各个轴误差相互叠加，误差大 |
| 运动质量 | 运动质量小；只存在主轴和杆的运动；工件和工作台不动 | 运动质量大；一个轴使其后的轴都运动；工件、工作台大部分都要运动 |
| 动特性 | 即使大型机床，也具有很好的动特性 | 动特性随着机床尺寸而不同，尺寸加大，动特性变差 |
| 轴间联系 | 各轴相互关联，各轴关系是非线性的 | 各轴间只有很少的关联 |
| 调节 | 调节复杂，必须对整个系统进行调节调节简单 | 各个轴可以单独调节 |
| 校正 | 校正复杂；至今只做过很少校正试验校正简单 | 许多校正工作是相同的 |
| 运动学 | 后退运动简单；需要进行坐标变换前进运动简单 | 在三轴时不需要进行坐标变换 |

当前虚轴机床的市场占有率还很低，原因大致有以下三方面：

1）虚轴机床虽然可产生 6 自由度的空间运动，但每个自由度的运动范围却不是很大，故机床的工作空间小。例如，动平台的倾角一般不超过 30°，无法完成诸如箱体五面加工等类的工作，这在一定程度上限制了它的应用。

2）由于这项技术尚处于开发的初期，某些厂家的虚轴机床性能并不理想，如精度、刚性等指标甚至低于普通机床，使得人们对这种新型机床持怀疑态度。

3）任何新事物都很难立刻得到人们充分的肯定。虚轴机床与传统机床几乎没有相似之处，要想得到人们的承认，更需时日。

大连机床集团开发设计的串并联型五轴联动数控机床 DCB510，如图 3-106 所示，主要技术参数见表 3-26，主要特点为：



图 3-106　串并联机床 DCB510

1）$X$，$Y$，$Z$ 三坐标由滑板连杆式三个虚拟轴并联而成，$A$ 轴、$C$ 轴为实轴。由于采用了串、并联结构，本机床即有并联机床刚性好、移动部件轻、速度快、加速度高的特点，同时又有各坐标工作范围的特点，其行程 $X$，$Y$，$Z$ 坐标分别为 630mm，630mm，500mm，$A$ 轴可达 140°，$C$ 轴可以超过 360°。

2）机床刚性好，整体性好。

3）由于具有五轴联动功能，因此，可以加工复杂型面，如叶轮、模具等。采用开放式多轴联动数控系统易于实现CAD/CAM。

表3-26 主要技术参数

| | | | |
|---|---|---|---|
| 工作范围 | *X*轴坐标 | mm | 630 |
| | *Y*轴坐标 | mm | 630 |
| | *Z*轴坐标 | mm | 500 |
| 主轴参数 | 刀具接杆-HSK空心锥柄 | | HSK-F63 |
| | 主轴前轴承内径 | mm | 55 |
| | 主轴电动机功率 | kW | 18 |
| | 主轴额定扭矩（连续工作） | N·m | 14 |
| | 主轴最大扭矩S-40% | N·m | 18.5 |
| | 主轴转速范围 | r/min | 100～20000 |
| | 主轴恒扭矩输出时转速 | r/min | 1200 |
| 工作台 | 台面尺寸 | mm | $\phi$1200 |
| | 承载能力 | kg | 1600 |
| 四轴运动参数 | *Z*轴最大进给力 | N | 4000 |
| | *X*，*Y*，*Z*三轴快进速度 | m/min | 80 |
| | *X*，*Y*，*Z*三轴工进速度 | mm/min | 60.000 |
| | *X*，*Y*，*Z*三轴快进加速度 | $m/s^2$ | 20 |
| | *X*，*Y*，*Z*三轴定位精度 | mm | ±0.012 |
| | *X*，*Y*，*Z*三轴重复定位精度 | mm | ±0.006 |
| *A*，*C*轴运动参数 | *A*轴最大转角 | （°） | 140 |
| | *A*轴最大转速 | r/min | 25 |
| | *A*轴转角精度 | S | ±3 |
| | *C*轴最大转角 | （°） | 450 |
| | *C*轴最大转速 | r/min | 25 |
| | *C*轴转角精度 | S | ±15 |
| | 机床总功率 | kW | 30 |
| | 机床轮廓尺寸（长×宽×高） | mm | 4135×2170×3150 |
| | 机床总重量 | kg | 100000 |

**3. 虚拟轴机床技术体系**

虚拟轴机床的出现不仅给机床行业带来了新的生长点，也促成了整个虚拟轴机床技术体系的形成和不断发展。虚拟轴机床涉及许多现代设计、制造、控制、测量、建模、仿真等高新技术，有大量理论与应用研究工作需要不断深入。虚拟轴机床技术的关键技术主要有以下几个方面：

（1）虚拟轴机床的基础理论　包括构型和尺度综合优化方法；精度建模及分析；

作业空间及干涉分析等。例如，6个伸缩杆的长度决定动平台位置的一般理论及特例、虚拟轴机床的运动分析、虚拟轴机床的力学分析等。这些技术涉及到机器人学、机构学、运动学、力学、数学等多个研究领域。

（2）虚拟轴机床的控制技术　虚拟轴机床机械结构的简单是以控制系统的复杂为条件的，其控制技术包括虚拟轴机床的控制方法、控制精度、数控编程、故障自诊断、安全运行保障和生产线总控等方面，关键技术是通过对虚拟轴机床各驱动杆的控制，实现虚拟轴（传统概念的 $X$、$Y$、$Z$ 轴）的联动控制。

（3）虚拟轴机床的误差分折技术　虚拟轴机床虽然比传统机床具有更高的精度，但仍然存在影响加工精度的因素，且机床的校准、调整复杂而困难，因而需要专门的误差分析、校准和调节方法。

（4）虚拟轴机床的制造技术　包括虚拟轴机床的模块化技术、虚拟轴机床的标液化技术、数字式交流伺服控制系统、精确定位的机电技术等。

（5）直线电动机技术　直线电动机能直接把电磁力转变成直线运动，不采用滚珠丝杠这种把旋转运动转变为直线运动的传统办法。这样传动系统没有间隙，能够高速加速或减速，非常适合高速和高精度机械加工。

（6）热变形控制技术　驱动杆运动的任何热输入都会引起热膨胀问题，当用这种杆来进行定位长度测量时，常常造成误差。因此对这一问题需从两个方面入手来解决，一个是通过强制对流冷却来减少热变形，另一个是建立随时间变化的热输入模型，通过这些模型进行补偿来消除误差。

**4. 虚拟轴机床的研究方向**

（1）虚拟轴机床组成原理的研究　研究并联机床自由度计算、运动副类型、支铰类型，以及运动学分析、建模与仿真等问题。

（2）虚拟轴机床运动空间研究　包括运动空间分析及仿真、可达工作空间求解（如数值求解法、球坐标搜索法等）、机床干涉计算及位置分析等。

（3）虚拟轴机床结构设计研究　虚拟轴机床的结构设计包括很多内容，如机床的总体布局、安全机构设计、数控系统设计（包括数控平台建造、数控系统编程、数控加工过程仿真等）。

（4）虚拟轴机床刚度、精度、柔度和灵巧度研究　并联机构封闭回路的特性，使虚拟轴机床较传统串联结构机床具有更高的刚度，但这个特性引起的耦合问题相对地在动力分析上形成很大困扰。虚拟轴机床精度研究包括机床系统硬件研究（及机床制造前精度设计和精度描述）和系统输出精度研究（及机床制造后输出数据处理和精度评价）。虚拟轴机床柔度研究包括柔度分析、柔度评价指标及其在工作空间内分布等方面。灵巧度主要研究灵巧度指标及其分布等。

（5）虚拟轴机床误差研究　包括误差分析、建模及误差精度保证、测量系统设计等问题。

（6）虚拟轴机床模块设计与创建　根据工件加工的空间型和平面型，相应地把并联机床分为空间型虚拟轴机床和平面型虚拟轴机床两大类。虚拟轴机床按功能和结构可分为以下几个功能模块：①执行模块；②机座模块（静平台模块）；③动平台模块；

④机架模块；⑤定位模块；⑥驱动模块；⑦控制和显示模块；⑧润滑与冷却模块。

（7）新型虚拟轴数控机床的研究　虚拟轴数控机床是用数学制造的机床。因为这种机床的设计与运行要用到非常复杂的数学计算与推理。目前对于 Stewart 平台的理论研究已取得一些关键结论，还需进一步研究 Stewart 平台的综合分析，为虚拟轴数控机床的研制提供理论基础。

（8）虚拟轴机床控制的研究　包括高速、高精度的控制算法，刀具运动轨迹的直接控制和开放式数控系统等。虚拟轴机床的最大特点是机械结构简单而控制复杂，因此，控制研究在虚拟轴机床研究中具有举足轻重的作用。

**5. 应用展望**

自世界上第一台虚拟轴机床在 1994 年美国芝加哥国际机床博览会上面世以来，虚拟轴机床得到了突飞猛进的发展。已经从原型机制造、试验室试验阶段逐渐进入到了实用研究阶段。1998 年 4 月 6 日，我国正式宣布首台大型镗铣类虚拟轴机床原型样机研制成功，使我国成为世界上为数不多的拥有该项技术的国家。在动平台末端装备电主轴、机械手腕、激光器等执行机构，在一定范围内可实现多坐标数控加工、装配与测量等多种功能，适用于模具、叶片及航空航天业异形工件等复杂三维空间曲面的加工，具有广阔的应用前景和较好的性能价格比。表 3-27 列出了虚拟轴机床的一些可能的应用。

**表 3-27　虚拟轴机床的用途**

| 铣削 | 激光、水喷流加工 |
|---|---|
| 汽车<br>动力系<br>大型模型制作<br>大型刀具、模具、夹具<br>塑料与泡沫材料加工 | 钣金切割（主机厂） |
| 航空航天<br>铝结构件<br>复合材料<br>铆接 | 钣金焊接（主机厂） |
| 工模具、模型 | 水喷流切割（主机厂） |
| 发电<br>汽轮机<br>燃气轮机模具 | |
| 泵与压气机<br>空调<br>涡轮增压器<br>食品加工<br>泵 | |
| 生产加工中心 | |
| 木材加工 | |

## 3.9.8　电主轴

高速数控机床是实现高速加工的物质基础，而电主轴（Motorized-Spindle）又是高速数控机床的核心部件，其性能直接决定了机床的超高速加工性能，它不但要求较高的速度精度，而且要求连续输出的高转矩能力和非常宽的恒功率运行范围。因此，具备相应的高转速和高精度、高速精密和高效率特性的数控机床内装式电主轴应运而生。电主轴具有结构紧凑、质量轻、惯性小、动态特性好等优点，并可改善机床的动平衡，避免振动、污染和噪声，它在超高速切削机床上得到了广泛的应用。

### 1. 结构及原理

主轴是直接体现机床性能的关键部件。电主轴是一种机电一体化的功能部件，其电动机转子与主轴是一体的，无需任何机械连接。改变供电的频率，就可以实现主轴调速，如图 3-107 所示。电主轴的概念不应简单理解为只是一根主轴套筒，而应该是一套组件，包括定子、转子、轴承、高速变频装置、润滑装置、冷却装置内置编码器、换刀装置等。因此电主轴是高速轴承技术、润滑技术、冷却技术、动平衡技术、精密制造与装配技术及电动机高速驱动等技术的综合运用。图 3-108 所示为电主轴的结构简图。

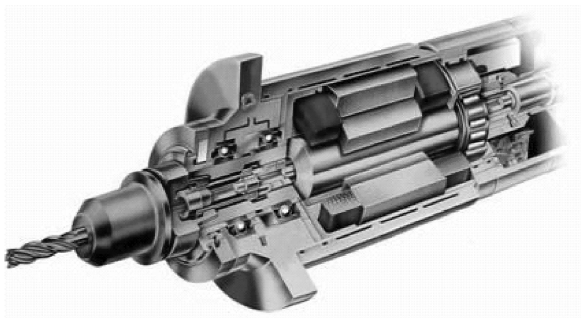


图 3-107　高速加工用的电主轴

电主轴取消了传统的皮带及齿轮传动，采用内装式 VAC 交流变频宽速电动机和主轴联为一体的直接驱动，即所谓的“零传动”。可以实现更高的速度、精度、效率。结构紧凑、质量轻、惯性小、振动小、噪声低、响应快，易于实现主轴定位，是高速主轴的理想结构。

### 2. 电主轴的特点

1）主轴由内装式电动机直接驱动，省去了中间传动环节，具有结构紧凑、机械效率高、噪声低、振动小和精度高等特点。

2）采用交流变频调速和矢量控制，输出功率大，调整范围宽，功率转矩特性好。

3）机械结构简单，转动惯量小，可实现很高的速度和加速度及定角度的快速准停。

4）电主轴更容易实现高速化，其

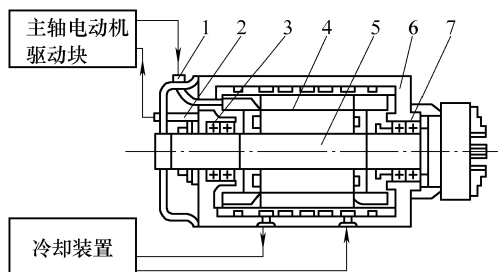



图 3-108　电主轴机构简图

1—电源接口　2—电动机反馈　3—后轴承　4—无外壳主轴电动机　5—主轴　6—主轴箱体　7—前轴承

动态精度和动态稳定性更好。

5）由于没有中间传动环节的外力作用，主轴运行更平稳，使主轴轴承寿命得到延长。

**3. 电主轴的类型**

电主轴按其轴承结构可分为滚动轴承电主轴、静压轴承电主轴和磁浮轴承电主轴；按其变频范围可分为高速（30～1500Hz）和低速（10～400Hz）；按照电动机数目可以分为单电动机和双电动机。

在数控机床设计中，具有单电动机和滚珠轴承结构的变频电主轴应用较为广泛。例如，瑞士 IBAG 公司生产的滚动轴承变频电主轴，有小型、中型和大型三个系列。此外，该公司还生产磁浮轴承和静压轴承的电主轴。图 3-109 所示为该公司生产的各种型号的电主轴。

**4. 关键技术**

（1）高速轴承技术　目前，电主轴应用的轴承主要有精密滚动轴承、液体动静压轴承、气体静压轴承和磁悬浮轴承等，但主要是精密角接触陶瓷球轴承和精密圆柱滚子轴承。液体动静压轴承的标准化程度不高；气体静压轴承不适合于大功率场合；磁悬浮轴承由于控制系统复杂，价格昂贵，其实用性受到限制。

角接触球轴承不但可同时承受径向和轴向载荷，而且刚度高，高速性能好，结构简单紧凑，品种规格繁多，便于维修更换，因而在电主轴中得到广泛的应用。目前随着陶瓷轴承技术的发展，应用最多的电主轴轴承是混合陶瓷球轴承，即滚动体使用 $Si_3N_4$ 陶瓷球，采用“小珠密珠”结构，轴承套圈为 GCr15 钢圈。这种混合轴承通过减小离心力和陀螺力矩，来减小滚珠与沟道间的摩擦，从而获得较低的温升及较好的高速性能。

（2）润滑技术　电主轴必须采用合理的、可控制的轴承润滑方式来控制轴承温升，保证数控机床工艺系统精度和稳定性。采用滚动轴承的电主轴的润滑方式目前主要有脂润滑、油雾润滑和油气润滑等方式。

脂润滑主要用于转速相对较低的电主轴中。脂润滑型电主轴的润滑系统简单，使用方便，无污染，通用性强。

油雾润滑具有润滑和冷却双重作用。它以压缩空气为动力，通过油雾器将油液雾化并混入空气流中，再输送到润滑位置。油雾润滑所需设备简单，维修方便，价格比较便宜，但污染环境，油耗较高。随着环保要求的提高，油雾润滑方式将逐渐被淘汰。

电主轴的润滑一般采用油气润滑，利用压缩空气将微量的润滑油分别连续不断地、精确地供给每一套主轴轴承，微小油滴在滚子和内、外滚道间形成弹性动压油膜，而压缩空气则可带走轴承运转所产生的部分热量。前两种润滑方式均无法准确地控制供油量，不利于主轴轴承转速和寿命的提高。而油气润滑方式则可以精确地控制各个摩擦点的润滑油量，可靠性极高。油气润滑是高速大功率电主轴轴承的最理想润滑方法，但其所需设备复杂，成本高。由于油气润滑方式润滑效果理想，目前已成为国际上最流行的润滑方式。

（3）热源分析　电主轴有两个主要的内部热源：内置电动机的发热和主轴轴承的




图 3-109　各种类型的电主轴

a）小型电主轴　b）中型电主轴　c）大型电主轴　d）磁浮轴承电主轴

e）静压轴承电主轴　f）空气轴承电主轴　g）Plug&Go 电主轴

发热。如果控制不当，发热变形会严重降低机床的加工精度和轴承寿命，从而缩短电主轴的使用寿命。

电主轴由于采用内藏式主轴结构形式，位于主轴单元体中的电动机不能采用风扇散热，因此自然散热条件较差。电动机在实现能量转换过程中，内部产生功率损耗，

从而使电动机发热。研究表明，在电动机高速运转条件下，有近 1/3 的电动机发热量由电动机转子产生，并且转子产生的绝大部分热量都通过转子与定子间的气隙传入定子中，其余 2/3 的热量产生于电动机的定子。所以，对电动机产生发热的主要解决方法是对电动机定子采用冷却液的循环流动来实行强制冷却。典型的冷却系统是用外循环水式冷却装置来冷却电动机定子，将电动机的热量带走。

角接触球轴承的发热主要是滚子与滚道之间的滚动摩擦、高速下所受陀螺力矩产生的滑动摩擦及润滑油的粘性摩擦等产生的。减小轴承发热量的主要措施：①适当减小滚珠的直径可以减小离心力和陀螺力矩，从而减小摩擦，减少发热量；②采用新材料（如陶瓷）做滚珠，陶瓷球轴承与钢质角接触球轴承相比，在高速回转时，滚珠与滚道间的滚动和滑动摩擦减小，发热量降低；③采用合理的润滑方式，如油气润滑对轴承不但具有润滑作用，还具有一定的冷却作用。

（4）设计装配　电主轴要获得好的性能和使用寿命，必须对电主轴各个部分进行精心设计和制造。电主轴的定子由具有高导磁率的优质矽钢片叠压而成，定子内腔带有冲制嵌线槽。转子由转子铁芯、鼠笼和转轴三部分组成。主轴箱的尺寸精度和位置精度也将直接影响主轴的综合精度。通常将轴承座孔直接设计在主轴箱上，为加装电机定子，必须至少开放一端。

主轴高速旋转时，任何小的不平衡质量即可引起电主轴大的高频振动。因此精密电主轴的动平衡精度要求达到 G1 ~ G0. 4 级。对于这种等级的动平衡，采用常规的方法即仅在装配前对主轴上的每个零件分别进行动平衡是远远不够的，还需在装配后进行整体的动平衡，甚至还要设计专门的自动平衡系统来实现主轴的在线动平衡。另外，在设计电主轴时须严格遵守结构对称原则，禁止使用键连接和螺纹连接，而普遍采用过盈连接，并以此来实现转矩的传递。过盈连接与螺纹连接或键连接相比，具有不会在主轴上产生弯曲和扭转应力，对主轴的旋转精度没有影响，主轴的动平衡易得到保证等优点。

（5）运动控制　在数控机床中，电主轴通常采用变频调速方法。目前主要有普通变频驱动和控制、矢量控制驱动器的驱动和控制及直接转矩控制三种控制方式。

普通变频为标量驱动和控制，其驱动控制特性为恒转矩驱动，输出功率和转速成正比。普通变频控制的动态性能不够理想，在低速时控制性能不佳，输出功率不够稳定，也不具备 $C$ 轴功能；但价格便宜、结构简单，一般用于磨床和普通的高速铣床等。

矢量控制技术模仿直流电动机的控制，以转子磁场定向，用矢量变换的方法来实现驱动和控制，具有良好的动态性能。矢量控制驱动器在刚起动时具有很大的转矩值，加之电主轴本身结构简单，惯性很小，故起动加速度大，可以实现起动后瞬时达到允许极限速度。这种驱动器又有开环和闭环两种，后者可以实现位置和速度的反馈，不仅具有更好的动态性能，还可以实现 $C$ 轴功能；而前者动态性能稍差，也不具备 $C$ 轴功能，但价格较为便宜。

直接转矩控制是继矢量控制技术之后发展起来的又一种新型的高性能交流调速技术，其控制思想新颖，系统结构简洁明了，更适合于高速电主轴的驱动，更能满足高速电主轴高转速、宽调速范围、高速瞬间准停的动态特性和静态特性的要求，已成为

交流传动领域的一个热点技术。

**5. 电主轴的发展趋势**

随着机床技术、高速切削技术的发展和实际应用的需要，人们对机床电主轴的性能也提出了越来越高的要求，电主轴技术的发展趋势主要表现在以下几个方面：

1）向高速大功率和低速大转矩方向发展。

2）向高精度、高刚度方向发展。

3）向精确定向（准停）方向发展。

4）向快速起、停方向发展。

5）向超高速方向发展。

6）向标准化方向发展。

# 第 4 章　在仪器仪表中的应用

## 4.1　光电编码器

光电编码器是一种集光、机、电于一体的数字化检测装置，可以高精度测量被测物的转角或直线位移量。这种检测方式具有非接触式、无摩擦和磨损、驱动力矩小、响应速度快、分辨率高、精度高、结构简单、体积小、使用可靠、易于维护、性价比高等优点。近十几年来，发展成一种成熟的多规格、高性能的系列工业化产品，在数控机床、机器人、雷达、光电经纬仪、地面指挥仪、高精度闭环调速系统、伺服系统等诸多领域中得到了广泛的应用。

### 4.1.1　光电编码器的工作原理

光电编码器是一种光学式位置检测元件，编码盘直接装在电动机的旋转轴上，将输至轴上的机械、几何位移量转换成脉冲或数字量的传感器，主要用于速度或位置（角度）的检测。光电编码器是由光栅盘和光电检测装置组成。光栅盘是在一定直径的圆板上等分地开通若干个长方形孔。由于光电码盘与电动机同轴，电动机旋转时，光栅盘与电动机同速旋转，经发光二极管等电子元件组成的检测装置检测输出若干脉冲信号。光电编码器原理示意图如图 4-1 所示。通过计算每秒光电编码器输出脉冲的个数就能反映当前电动机的转速。此外，为判断旋转方向，码盘还可提供相位相差 90°的两路脉冲信号。

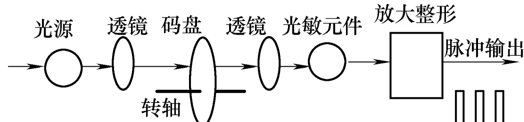


图 4-1　光电编码器原理示意图

### 4.1.2　光电编码器的结构

光电式脉冲编码器的结构如图 4-2 所示。在一个圆盘的圆周上刻有等间距线纹，分为透明和不透明的部分，称为圆光栅。圆光栅与工作轴一起旋转。与圆光栅相对，平行放置一个固定的扇形薄片，称为指示光栅，上面制有相差 1/4 节距的两个狭缝（辨向狭缝）。此外，还有一个零位狭缝（每转发出一个脉冲）。脉冲发生器通过十字连接头或键与伺服电动机相连。当圆光栅旋转时，光线透过这两光栅的线纹部分，形成明暗相间的条纹，被光电元件接受，并变换成测量脉冲，其分辨率取决于圆光栅的一圈线纹数和测量电路的细分倍数。脉冲编码器主要技术性能见表 4-1。

当圆光栅与工作轴一起转动时，光线透过两个光栅的线纹部分，形成明暗相间的条纹。光电元件接受这些明暗相间的光信号，并转换为交替变换的电信号。该电信号为两组近似于正弦波的电流信号 A 和 B，如图 4-3 所示。A 和 B 信号相位相差 90°，经

放大和整形变成方形波。通过两个光栅的信号，还有一个每转脉冲，称为 Z 相脉冲，该脉冲也是通过上述处理得来的。Z 脉冲用来产生机床的基准点。后来的脉冲被送到计数器，根据脉冲的数目和频率可测出工作轴的转角及转速。其分辨率取决于圆光栅的圈数和测量线路的细分倍数。

表 4-1　脉冲编码器主要技术性能

| | | | |
|---|---|---|---|
| 电源 | 5V ±1V，≤0.35A | 温度范围 | 0～60℃ |
| 输出信号 | A，$\overline{A}$；B，$\overline{B}$；Z，$\overline{Z}$ | 轴向频动 | 0.02mm |
| 每转脉冲数 | 2000，2500，3000 | 转子惯量 | <5.7kg · $cm^2$ |
| 电源 | 5V ±1V，≤0.35A | 温度范围 | 0～60℃ |
| 最高转速 | 2000r/min | 阻尼转距 | <8N · cm |

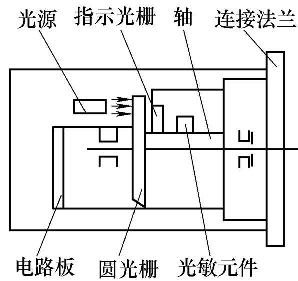



图 4-2　光电式脉冲编码器的结构

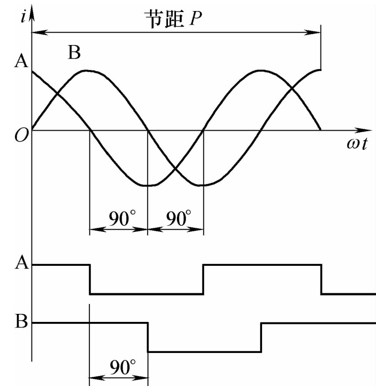



图 4-3　脉冲编码器输出波形

## 4.1.3　光电编码器的类型

根据光电编码器产生脉冲的方式不同，可以分为增量式、绝对式及复合式三大类。按编码器运动部件的运动方式来分，可以分为旋转式和直线式两种。由于直线式运动可以借助机械连接转变为旋转式运动，反之亦然，因此，只有在那些结构形式和运动方式都有利于使用直线式光电编码器的场合才予以使用。旋转式光电编码器容易做成全封闭型式，易于实现小型化，传感长度较长，具有较强的环境适用能力，因而在实际工业生产中得到广泛的应用。

### 1. 增量式编码器

增量式编码器工作原理如图 4-4a 所示。在图中，E 为等节距的辐射状透光窄缝圆盘，$Q_1$、$Q_2$ 为光源，$D_A$、$D_B$、$D_C$ 为光电元件（光敏二极管

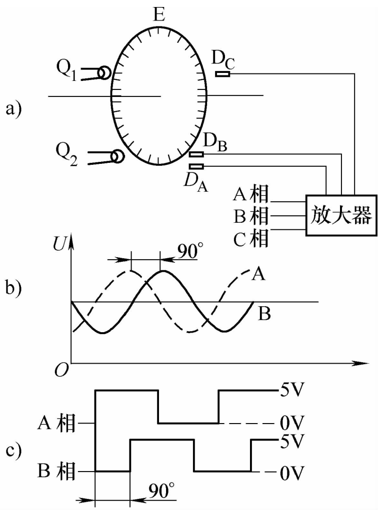



图 4-4　增量式编码器工作原理

或光电池)，$D_A$ 与 $D_B$ 错开 90°相位角安装。当圆盘旋转一个节距时，在光源照射下，光电元件 $D_A$，$D_B$ 上得到图 4-4b 所示的光电波形输出，A，B 信号为具有 90°相位差的正弦波，这组信号经放大器放大与整形，得到图 4-4c 的输出方波，A 相比 B 相导前 90°，其电压幅值为 5V。设 A 相导前 B 相时为正方向旋转，则 B 相导前 A 相时即为负方向旋转。利用 A 相与 B 相的相位关系可以判别编码器的旋转方向，C 相产生的脉冲为基准脉冲，又称为零点脉冲，它是轴旋转一周在固定位置上产生一个脉冲，在数控车床上切削螺纹时，可将它作为车刀进刀点和退刀点的信号使用，以保证切削的螺纹不会乱扣。在加工中心上可作为主轴准停信号，以保证主轴和刀库间的可靠换刀。AB 相脉冲信号经频率—电压变换后，得到与转轴转速成比例的电压信号，便可测得速度值及位移量。

它的优点是原理构造简单，机械平均寿命可在几万小时以上，抗干扰能力强，可靠性高，适合于长距离传输。其缺点是无法输出轴转动的绝对位置信息。

**2. 绝对值式编码器**

绝对式编码器是利用自然二进制或循环二进制（葛莱码）方式进行光电转换的直接输出数字量的传感器。在它的圆形码盘上沿径向有若干同心码道，每条码道上由透光和不透光的扇形区相间组成，相邻码道的扇区数目是双倍关系，码盘上的码道数就是它的二进制数码的位数，在码盘的一侧是光源，另一侧对应每一码道有一光敏元件。当码盘处于不同位置时，各光敏元件根据受光照与否转换出相应的电平信号，形成二进制数。

图 4-5 所示的葛莱编码盘中空白的部分透光，用“0”表示；涂黑的部分不透光，用“1”表示。此码盘共有十六份和四环，由里向外每一环配置的光电变换器对应 $2^3$、$2^2$、$2^1$ 和 $2^0$。

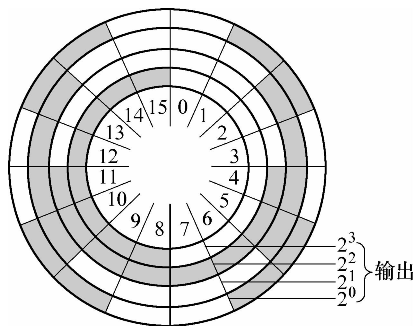


图 4-5　葛莱编码盘

这种编码器的特点是不要计数器，在转轴的任意位置都可读出一个固定的与位置相对应的数字码。显然，码道越多，分辨率就越高，对于一个具有 $n$ 位二进制分辨率的编码器，其码盘必须有 $n$ 条码道。编码器的码道数目决定了该编码器的分辨力。将码盘加工成数个码道，每个码道有黑白分明的码字组成，外层码道代表二进制的最低位，最里面的码道代表二进制的最高位，码字的排列按二进制规律进行，二进制码盘的码道数 $n$ 和码道编码容量 $M$ 之间关系为：

$$M = 2^n \tag{4-1}$$

角度分辨率 $\alpha$ 与码道数 $n$ 间的关系为

$$\alpha = 360°/M = 60°/2^n \tag{4-2}$$

显然，$n$ 越大，能分辨的角度就越小，测量角位移也就越精确。为了得到高分辨力和高精度，就要增大码盘的尺寸，以容纳更多的码道。

**3. 混合式绝对值编码器**

混合式绝对值编码器，它输出两组信息，一组信息用于检测磁极位置，带有绝对信息功能；另一组则完全与增量式编码器的输出信息相同。

## 4.1.4　光电脉冲编码器的应用实例

EPC—755A 光电编码器具备良好的使用性能，在角度测量、位移测量时抗干扰能力很强，并具有稳定可靠的输出脉冲信号，且该脉冲信号经计数后可得到被测量的数字信号。汽车驾驶模拟器对方向盘旋转角度的测量选用 EPC—755A 光电编码器作为传感器，其输出电路选用集电极开路型，输出分辨率选用 360 个脉冲/圈，考虑到汽车方向盘转动是双向的，既可顺时针旋转，也可逆时针旋转，需要对编码器的输出信号鉴相后才能计数。图 4-6 给出了光电编码器实际使用的鉴相与双向计数电路，鉴相电路用 1 个 D 触发器和 2 个与非门组成，计数电路用 3 片 74LS193 组成。

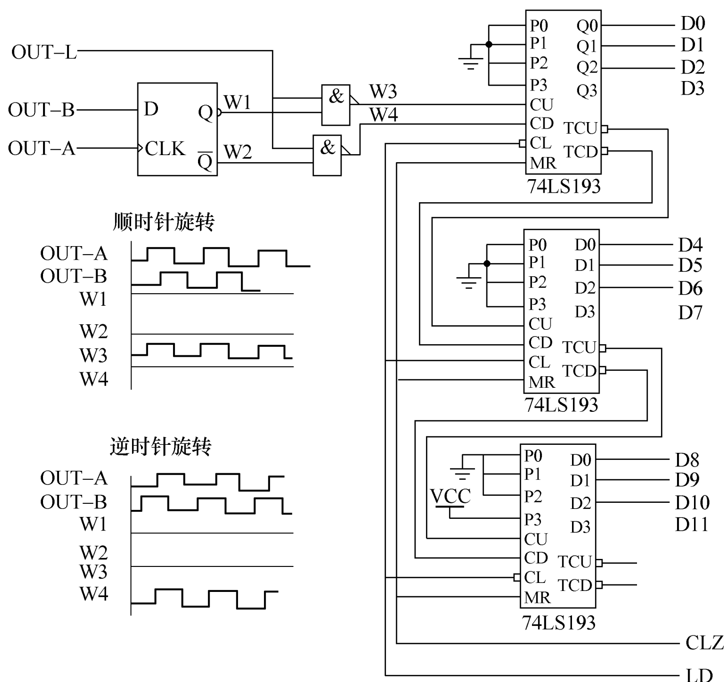



图 4-6　光电编码器鉴相计数电路

当光电编码器顺时针旋转时，通道 A 输出波形超前通道 B 输出波形 90°，D 触发器输出 Q（波形 W1）为高电平，Q（波形 W2）为低电平，上面与非门打开，计数脉冲通过（波形 W3），送至双向计数器 74LS193 的加脉冲输入端 CU，进行加法计数；此时，下面与非门关闭，其输出为高电平（波形 W4）。当光电编码器逆时针旋转时，通道 A 输出波形比通道 B 输出波形延迟 90°，D 触发器输出 Q（波形 W1）为低电平，Q（波形 W2）为高电平，上面与非门关闭，其输出为高电平（波形 W3）；此时，下面与非门打开，计数脉冲通过（波形 W4），送至双向计数器 74LS193 的减脉冲输入端 CD，进行减法计数。

汽车方向盘顺时针和逆时针旋转时，其最大旋转角度均为两圈半，选用分辨率为 360 个脉冲/圈的编码器，其最大输出脉冲数为 900 个；实际使用的计数电路用 3 片 74LS193 组成，在系统上电初始化时，先对其进行复位（CLR 信号），再将其初值设为 800H，即 2048（LD 信号）。如此，当方向盘顺时针旋转时，计数电路的输出范围为 2048～2948；当方向盘逆时针旋转时，计数电路的输出范围为 2048～1148；计数电路的数据输出 D0～D11 送至数据处理电路。

实际使用时，方向盘频繁地进行顺时针和逆时针转动。由于存在量化误差，工作较长一段时间后，方向盘回中时计数电路输出可能不是 2048，而是有几个字的偏差。为解决这一问题，我们增加了一个方向盘回中检测电路。系统工作后，数据处理电路在模拟器处于非操作状态时，系统检测回中检测电路。若方向盘处于回中状态，而计数电路的数据输出不是 2048，可对计数电路进行复位，并重新设置初值。

## 4.2　光纤传感器

光纤传感器是一种通过传光特性的检测来感测外部环境（物理的、化学的或生物的等）变化的一种装置。仅探测的物理量就有 100 多种，它的优点除应用范围广外，还具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、绝缘性好、耐腐蚀、可挠曲、体积小及与光纤传输线路兼容性好等优点。在军事、科技、工业过程控制、医学、测量仪器等各个领域都具有十分广泛的应用。

### 4.2.1　光纤传感器的基本结构

按构成形式划分，光纤传感器主要有两大类型，一类是传感型，如图 4-7a 所示，光纤本身起着传感器的作用；另一类是传光型，在这类结构中，光纤以其低损耗、轻细等待点，在不干扰被测对象状态的情况下传输所感测的信号，如图 4-7b 所示。

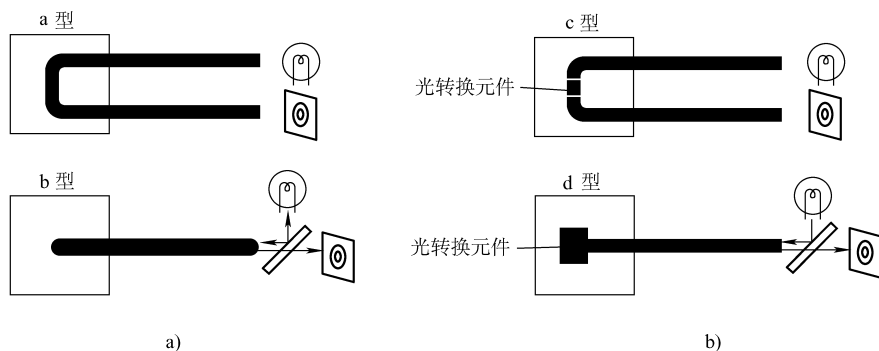



图 4-7　光纤传感器的基本形式

利用光纤传输容量大的持点，结合多个不同类型的传感器可以组合成光纤传感网络系统。近年来出现的所谓分布式光纤传感器与光纤蒙皮系统即是这类光纤传感系统的最新发展。

## 4.2.2　光纤传感器的工作原理

### 1. 传感型光纤传感器的工作原理

这类传感器是利用被测对象的状态（物理的、化学的等）引起光纤传输特性变化，从而通过检测光纤中所传输光波的振幅（强度）、相位、偏振态与频率等的变化来确定被测对象的状态的。引起光纤传输参数或光波本身的变化，直接或间接地与各种物理效应有关。表 4-2 中列出了常用的各种物理效应与检测量之间的关系。

表 4-2　传感型光纤传感器所用的主要物理效应与检测量

| 传输参数的变化 | | 光本身的变化 | |
|---|---|---|---|
| 物理效应 | 检测量 | 物理效应 | 检测量 |
| 光散射效应 | 畸变、振动、音响等 | 萨格奈克效应 | 旋转（角速度） |
| 光弹性效应 | 压力、温度、应变、音响、流速、加速度等 | 多普勒效应 | 速度 |
| 法拉第效应 | 磁场、电流等 | 光谱吸收效应 | 化学量 |
| 光致色彩效应 | 光、放射性射线等 | 光散射效应 | 浊度、浓度等 |

### 2. 传光型光纤传感器的工作原理

这类传感器是利用被测对象的状态引起光变换器件工作状态变化，从而通过检测与光变换器连接的光纤中所传输光波参数的变化来确定被测对象的状态的。表 4-3 中列出了常用的几种光变换器与待测量之间的关系。

表 4-3　传光型光纤传感器主要光转换元件与检测量

| 光转换元件 | 检测量 | 光转换元件 | 检测量 |
|---|---|---|---|
| 液晶 | 温度、压力、振动等 | 光弹性元件 | 压力、温度、应变、音响 |
| 半导体膜 | 温度等 | 荧光物质 | 放射线等 |
| 泡克尔斯 | 电场、电压 | 遮光电路 | 位移、振动、旋转等 |
| 法拉第元件 | 磁场、电流 | 电子电路 | 电磁场、其他 |

（1）光纤温度传感器　图 4-8 给出了几种传感型光纤温度传感器的工作原理图。图 a 是因为温度改变使所传输光散射到光纤外，从而使光的振幅发生变化，这是一种最简单的传感器结构，灵敏度很差；图 b 利用了光纤偏振动面的旋转，温度引起光纤偏振特性的变化，可通过偏振器反映出来；图 c 与图 d 则利用了光的相位变化来检测温度。因为温度变化使得单模光纤长度、折射率及蕊径等发生变化，从而使传输光的相位区发生变化。图 c 和图 d 分别采用了马赫-然德干涉仪与法布里-泊罗干涉仪光路结构。前一种可以通过所形成的明亮干涉条纹的移动来测量：而后一种则可通过输出光强变化来测量。这两种方式式都具有很高的灵敏度，但是随之而来的缺点是普通单模光纤的相位变化还与其他外界因素如振动、压力有关。因此，必须将这些干扰降低才有可能发挥其作用。

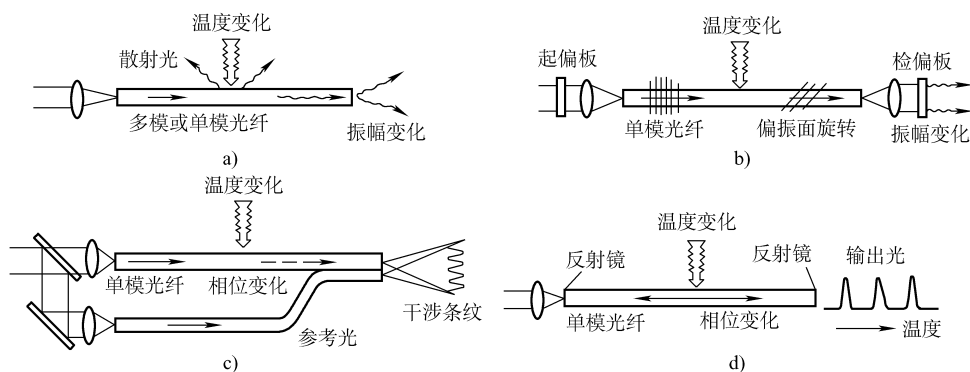



图 4-8　传感型光纤温度传感器的工作原理

a）振幅变化　b）偏振面旋转　c）相位变化（马赫-然德型）　d）相位变化（法布里-泊罗型）

（2）光纤压力、振动传感器

这种传感器利用压力（或振动）使光纤变形，从而使其传输特性发生变化的原理。压力引起光纤形状和尺寸变化，由于弹光效应而使得光纤折射率随之改变，结果引起沿光纤传输的光的相速变化和偏振面旋转（见图 4-9a）；压力引起折射率不连续的变化会引起传输光的散射损耗增加（见图 4-9b）。

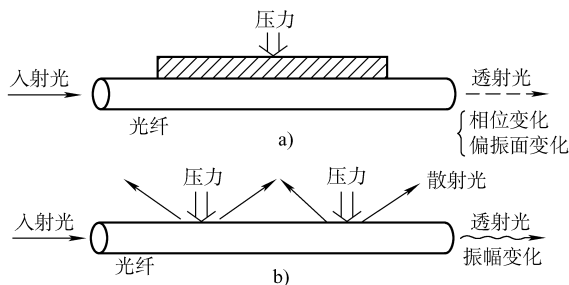



图 4-9　光纤压力传感器的基本结构

因此，只要测出相应的相速、偏振或光强的变化就能确定其压力（或振动）大小。图 4-10 为一种利用光纤微弯效应制作的压力传感器。光纤在压力作用下发生许多微弯而使传输光从纤芯泄漏出去，压力愈大，泄漏出去的光愈多。利用传输光相速与偏振变化进行传感可以得到高的灵敏度。为了进行检测需用到光的干涉与检偏等特殊方法。其缺点是它们易于受到其他因素的干扰，特别是温度影响。这时需要尽力加以克服，例如当其在检测压力（或振动）时，当压力变化周期比温度变化周期高得多时，

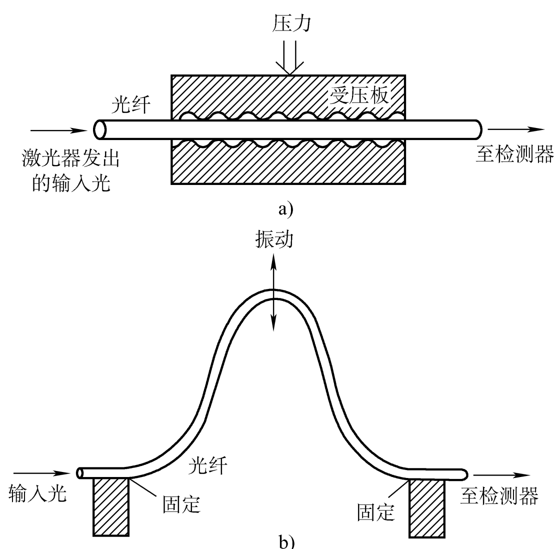



图 4-10　利用微弯效应的光纤压力

a）振动　b）传感器

可以用滤波方法将光电转换后电信号中与温度变化有关的成分分离开。

（3）光纤位移传感器　位移传感器是机械量传感器中的基本传感器，应用很广。光纤位移传感器虽然测量的位移范围较小，但它可以获得高的灵敏度（或分辨率），因此在许多应用场合，除了将它应用来直接测量位移外，还常将其他机械量，如压力、振动等转换成位移量进行检测。

## 4.3　便携式隧道断面激光测量仪

便携式隧道断面激光测量仪除了可以测量隧道断面限界外，还可用于地铁、矿井、房屋等的各种建筑物限界的测量。另外，还兼有激光导向、激光水准、激光准直等方面的用途。具有智能化程度高、测量误差小、实时快速、小型便携等特点。

### 4.3.1　便携式隧道断面激光测量仪的工作原理

在系统中采用了光电三角交会极坐标测量原理，利用直角三角形已知一边一角推算另一边长的方法来测量断面尺寸，如图 4-11 所示，测量半径为

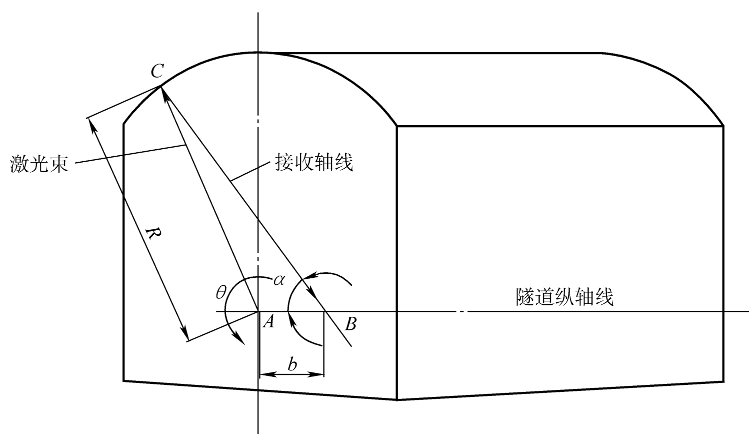



图 4-11　测量原理图

$$R = b \times \tan\alpha$$

式中　$b$——仪器基线边长，$b = 600\text{mm}$；

$\alpha$——跟踪测量角。

为了能测得断面上多个 $R$ 值，三角形 $ABC$ 的基线边 $AB$ 必须绕垂直于测量断面作 $\theta$ 角的扫描旋转。在扫描过程中可以连续测量，也可以间隔测量。测量精度主要取决于 $\alpha$ 的测量精度。

测量角 $\alpha$ 的计量和跟踪过程利用激光器单色性强、光密度高、发散角小的特点，使其在 $A$ 点发射，在隧道壁上 $C$ 点形成光斑。在 $B$ 点设光电瞄准跟踪接收头，在光电接收头里，$C$ 点的漫散射光被透镜聚焦，干涉滤光片滤光后被光电倍增管接收，其光电信号经放大滤波后，送入单片机系统内部 A/D 转换器进行采集处理，从单片机二个

PWM 输出口输出正转或逆转的控制信号，经 π 型滤波器，得到相应的正转或逆转直流控制电压，经功率放大驱动伺服电动机动作，经 $i = 12000$ 的二级齿轮和一级蜗杆传动后，使光电接收头自动严格地对准 $C$ 点。$\alpha$ 角跟踪范围为 68° ~ 87°，其跟踪灵敏度小于或等于 5″。$\alpha$ 角的计量利用固定在伺服传动轴上的光电计数盘和可逆计数电路，其正反转的计数脉冲被单片机系统采集。$\alpha$ 角的计量从接收到光电接头初始位置 68°的三级复位信号开始。这样，测量角和复位角分辨率高达 36″。

### 4.3.2 便携式隧道断面激光测量仪的测量形式

扫描角 $\theta$ 的计量从单片机系统接收到扫描角 30°复位信号开始，单片机系统根据预置的扫描间隔输出相应的控制脉冲，经功率放大后驱动四相步进电动机，通过 $i = 12000$ 的蜗杆传动，实现扫描角 $\theta$ 的自动扫描。$\theta$ 角和复位角分辨率为 15″。

新型便携式隧道断面激光测量仪采用间隔逐点采样测量形式，扫描角断续扫描间隔可在 1° ~ 99°范围内任意预置。扫描范围从 30° ~ 330°。其自动扫描过程为：扫描启动→扫描暂停→测角瞄准→数据采样→数码显示→数据打印→扫描启动等，扫描完毕后自动返回到 30°初始位置。

### 4.3.3 便携式隧道断面激光测量仪的硬件构成

该仪器主要由单片机、LED 数码显示器、键盘、微型打印机、步进电动机、伺服电动机、通讯接口、He-Ne 激光器、光电倍增管、激光电源、快速充电电路、镍镉蓄电池组、数据掉电存储器、仪器水准定位机构和传动机构等组成，如图 4-12 所示。

该硬件系统中央处理单元采用了飞利浦 87C552 集成芯片，内含 8K 字节 RAM、8 路 10 位 A/D、2 路 PWM 输出、6 个 8 位 I/O 口等。仪器显示器由 6 位 LED 共阴极数码管组成，其段选由 74LS240（反相输出）驱动，位选由 MC1413 驱动。仪器控制键盘由运行键、功能选择键、设置键、复位键、数值加 1 和数值减 1 键组成。测量角 68°和扫描角 30°复位信号分别送入单片机外部中断口 INT0 和 INT1。光电计数盘的信号经可逆计数电路后送入单片机 T0 和 T1 口，CPU 内部定时器/计数器 T0 和 T1 均被设置为计数方式。来自光电倍增管的光电接收信号经放大滤波后，送入单片机的 A/D 口 P5.0（ADC0）。根据 A/D 转换器采集的光电接收信号，单片机从 PWM1 和 PWM2 口输出相应的脉宽调制波，经滤波后形成直流控制电压，对 12V 直流伺服电动机进行实时控制。不仅控制伺服电动机的转向，而且控制其转速大小，以最短的时间对准光点。扫描控制脉冲从 P1.0 ~ P1.3 口输出，经功率放大后，驱动直流 12V 四相步进电动机。

### 4.3.4 便携式隧道断面激光测量仪的软件设计

该仪器的设计程序主要有系统主程序、初始化程序、中断服务程序、键盘扫描子程序、键盘处理及数据处理子程序、打印子程序、串行通信子程序、步进电动机驱动子程序、数据采集及 PWM 输出子程序、报警子程序（当光点接收头跟踪不到光点或仪器故障时进行声光报警）、串行 E2PROM 写入和读出子程序等。

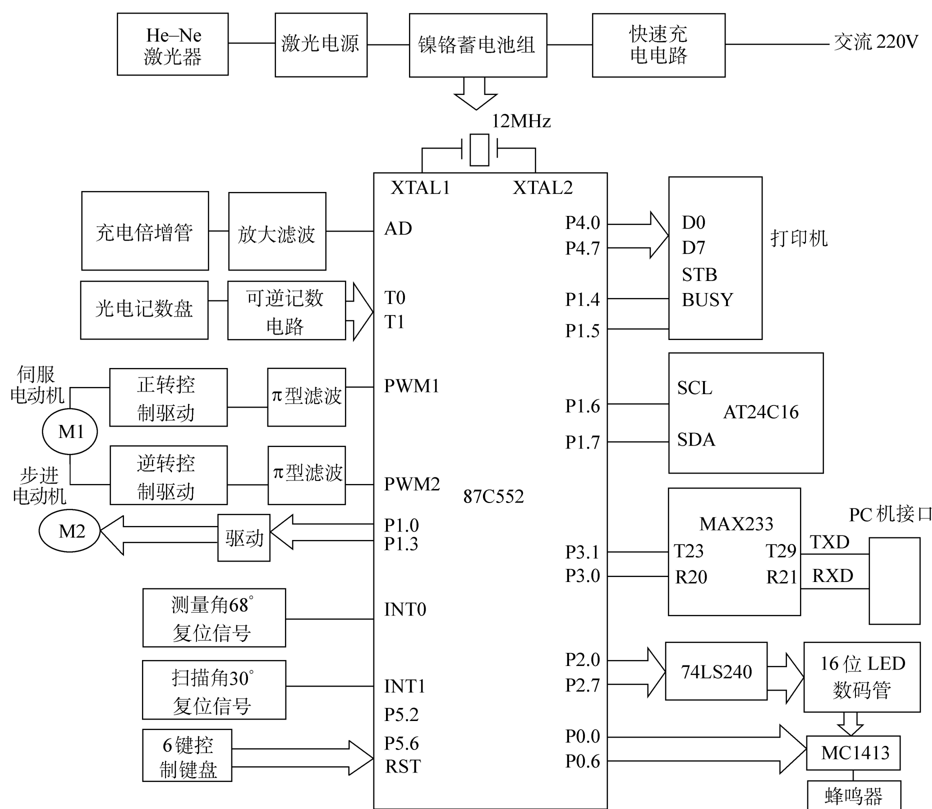



图 4-12　硬件组成框图

### 4.3.5　便携式隧道断面激光测量仪的测试项目和结果

1）接收灵敏度。在 15～105m 范围内，接收灵敏度能满足各种类型的围岩和衬砌测量的要求，对白墙、花岗岩、混凝土、紫棕砂岩、深灰石灰岩、炭质页岩和煤等不论在干燥或水饱和状态下，均有良好接收强度和信噪比。

2）表面形状跟踪。在坑洼不平的岩体表面上能有效地跟踪。试验证明，本仪器接收头的跟踪明视范围约为 ±15′，对 10m 处的岩石在 ±52cm 以内的扫描径向凸凹跳动，仍能实现平稳的跟踪。

3）测量精度。隧道高度和宽度的测量精度为 $\pm 1 \times 10^{-3}$，能将多个隧道断面数据通过仪器通信接口传送给 PC 机，实时计算隧道面积并给出隧道超挖或欠挖的结果。

## 4.4　激光准直仪

### 4.4.1　激光准直仪的工作原理

由激光器发出一束激光，用望远镜系统使光束在不同距离上聚焦或使光束截面直

径为 10mm 左右，近似平行。它的亮度分布对中心而言是对称的。可用诸如四象限光电探测器来寻找光束中心，该中心的轨迹为一直线。利用这条光束作为准直和测量的基准线，在需要准直的点上用光电探测器接收，如图 4-13 所示。四象限光电探测器固定在被准直的工件上，当激光束照射至四块光电池上时，产生电压 $U_1$，$U_2$，$U_3$，$U_4$。利用两对角象限（1 和 3）与（2 和 4）的差值决定光束中心的位置。若激光束中心和探测器中心重合时，由于四块光电池接收相同的光能量，此时指示电表指零；当激光束中心与探测器中心有偏离时，特有偏差信号 $U_x$ 和 $U_y$。$U_x = U_2 - U_4$；$U_y = U_1 - U_3$，其大小和方向由电表指示。这个方法比用人眼通过望远镜瞄准方便，精度也有提高。但其准直精度受激光束本身的特性限制。若要求得到很高的准直精度，则须使激光束具有高度的稳定性，以及激光束任意截面上的强度分布有稳定的中心。

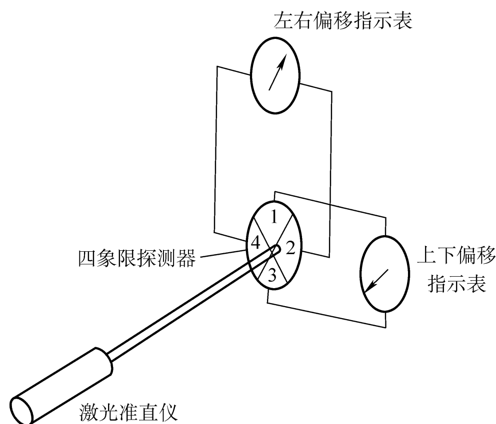



图 4-13　激光准直原理

## 4.4.2　激光准直仪的组成

激光准直仪主要由激光发射器、扩束望远镜、光电接收靶及其他辅助装置组成，如图 4-14 所示。激光束由氦氖激光器产生，经扩束望远镜射出一定直径的可见平行光束，光束横截面上光能的分布近似于正态分布，每个截面上能量分布中心的连线构成一条理想直线，利用这一理想直线作为准直测量的基准线。

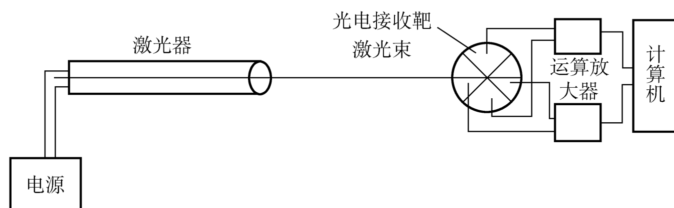



图 4-14　激光准直仪的组成

**1. 激光器**

目前，仍有不少激光准直仪采用单横模（$TEM_0$）输出的 He-Ne 激光器，其功率约 1 ~ 2mW，波长 632.8nm。对这种激光器的要求，主要是光束方向的漂移要尽可能小，因为激光束的漂移将直接导致准直误差。为了提高准直精度，在激光器装置上可采取以下一些减少光束漂移的措施。

1）热稳定装置。这种装置如图 4-15 所示。在激光器外壳 1 外面放一个波形管 2，其作用是与激光器外表面保持良好的接触。波形管采用导热性较好的金属材料，如不

锈钢或磷青铜。波形管的周围填充有低导热系数和高比热容量的绝缘材料 3，如颗粒状的氧化镁。在氧化镁的外面是由导热较好的材料制成的套筒 4，两端用绝热材料环将波形管与套筒之间的绝热材料封闭住。整个装置的作用是使激光器沿长度方向的温度梯度减少，而使装置工作温度维持较低的温度，从而减少变形。

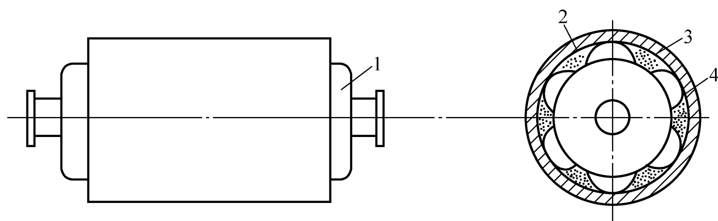



图 4-15　带热稳定装置的激光管

2）隔热装置。这种装置制成双层段钢外壳，如图 4-16 所示，包括外筒 1 和内筒 2，都不钻通风孔，在壳体的两端固定有环形盖 3。外筒 1 和内筒 2 之间有一个气密空间 4，或留空或填上绝缘材料或充入惰性气体。

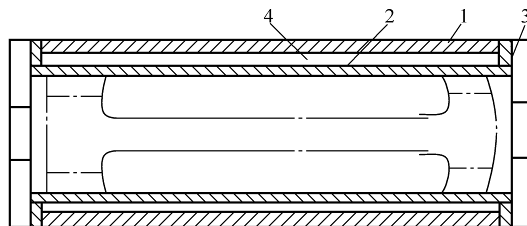



图 4-16　带隔热装置的激光器
1—外筒　2—内筒　3—环形盖　4—气密空间

3）光束补偿装置。图 4-17 是光束补偿装置，它用的是外腔管。图中角锥棱镜 4 的作用是使反射到激光谐振腔平面反射镜 5 上的光束总是平行于窗 6 上的入射光束，它与棱镜 4 的变动无关。同样，在窗 6 上的输出光束总是平行于窗 7 的入射光束，也与棱镜 4 的变动无关。因此，当有一个扭力使棱镜 4 变动时，它所反射的激光束并不改变它原来的路程。而且，腔反射镜 8 和 5 的位置靠得近，实际处于相同的环境条件，因此，两个面之间的相对运动很小。所以，当壳体变形时，输出光束相对原来的位置只有很小的横向位移和角偏移。

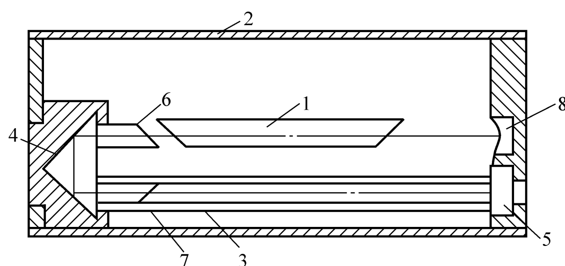



图 4-17　带光束补偿装置的激光器
1，3—光通道　2—外壳　4—棱镜
5，8—反射境　6，7—窗

4）改进腔体结构。如图 4-18 所示，锥形腔代替圆柱形腔可提高输出功率，且光束稳定性好。因为圆柱形腔内有用部分也主要是圆锥形的，而无用部分易使光束在管子内游荡，影响光束的稳定性。

5）增加毛细管的刚度。用氧化铝陶瓷制作毛细管或在玻璃毛细管上涂上一层陶瓷，可以增加毛细管的刚度，减少漂移约 30% 。

**2. 光学系统**

激光器出射的是高斯光束，有一定发散角。为了进一步改善光束的方向性，需加一个光学系统。在激光准直仪中，将望远镜倒置使用，可以缩小光束的发散角。例如，望远镜的角放大率为 10 倍，原来发散角为 1mrad 的激光束，经望远镜后其发散角缩小为 0.1mrad，而光束孔径增大 10 倍。

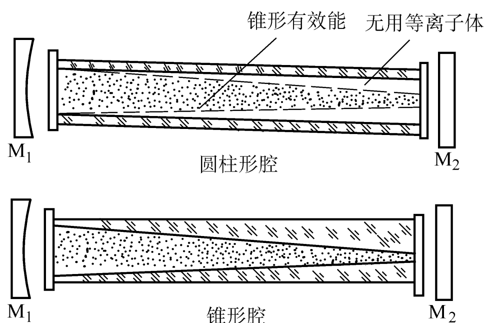


图 4-18　改进腔体结构的激光器

在激光准直仪中常采用开普勒形式的倒置望远镜。如图 4-19 所示，在视场光阑位置上（也就是物镜的像方焦点和目镜的物方焦点的重合点上）加一个空间滤波器（小孔光阑 $S$）以消除杂散光，改善准直光束的质量。光阑的直径在 8μm ~ 0.01mm 左右。当加上空间滤波器后，输出光束的质量将有很大改善。激光斑中的干涉环和斑点基本消除，有利于提高仪器的对准精度。

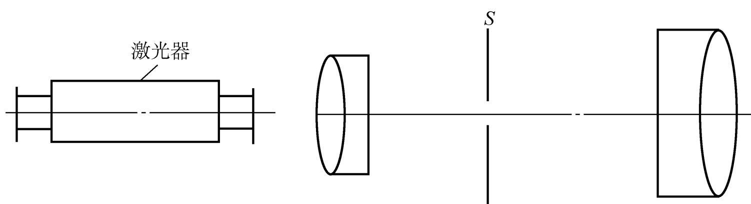
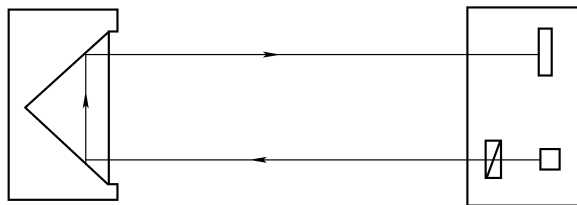


图 4-19　开普勒倒置望远镜

这种形式的望远镜镜筒较长，为适应某些使用上的要求，需要尽量缩短镜筒。这时，可考虑改用内调焦形式的倒置望远镜。由于增加调焦镜，会在一定程度上增加反射杂散光和光能吸收。但它有镜筒短、体积小的优点。

半导体激光器的发散角较大，常用一准直物镜（如双胶合物镜：$f = 28$mm，$D = 8$mm）将其发散角压缩至 3.57mrad。有的准直仪中还采用角锥棱镜组成的自准光路，如图 4-20 所示。


图 4-20　带角锥棱镜的自准光路

### 3. 光电探测器及运算电路

在准直仪中广泛应用四象限光电器件以探测光束的中心位置。最常用的是硅光电池，它是用四个扇形的硅光电池组成，也有的是一片整的硅光电池正交切开 $N$ 层或 $P$ 层，形式具有公共基底的四象限，如图 4-21 所示。

四象限探测器中每片硅光电池的转换效率应该一致，它们之间的相对位置亦准确。光电探测器一般排成对角线形式。1、3 两片探测垂直方向，2、4 探测水平方向。为了补偿对角方向上两片硅光电池的不对称性，可采用平衡电阻来调节，如图 4-22 所示。

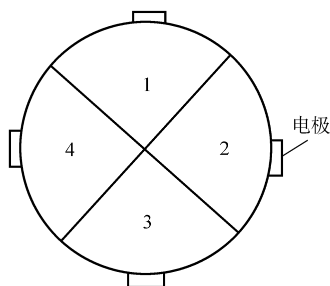



图 4-21　四象限硅光电池

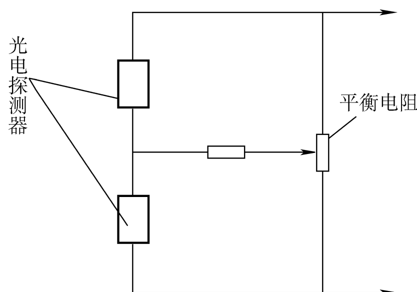



图 4-22　补偿硅光电池不对称性用的平衡电阻电路

## 4.4.3　激光准直的应用实例

激光准直可用在各种工业中，其中以大型机床、飞机制造、造船等工业的应用最为典型。

**1. 直线度测量**

如图 4-23 所示，将激光准直仪固定在机床床身上或放在床身外。在拖板上固定四象限光电探测器。测量时，先将激光束调到与被测机床导轨大体平行，再将四象限探测器对准光束。若测量机床拖板运动的直线度，则可将四象限的信号放大后输入记录器直接记录直线度的曲线。若测量导轨直线度，则可分段进行测量，读出每个测量点相对于激光束的偏差值。

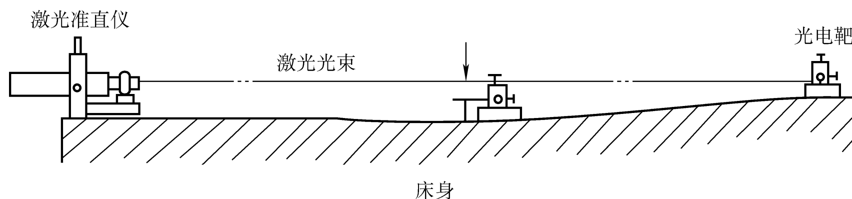



图 4-23　测量导轨直线度

在测量直线度时，激光准直仪较自准直仪有如下优点：

1）测量的读数是被测点相对激光束的偏移量，因此，测量结果无需进行数学处理。这方便了测量工作的进行，并且比较直观，尤其用在机床导轨的调整和安装更显优越。

2）在测量机床导轨不直度时，可同时测垂直和水平方向，因而大大提高了工效。

3）由于采用光电转换，所以容易实现自动化测量，并能测量机床的运动误差。

4）用普通自准直仪测长轨时，光能损失较大，因而成像不够清晰，而激光能量强，适合于长导轨测量。

**2. 同轴度测量**

原有的机械同轴度检测方法是利用百分尺、千分表及测隙规，配合估计和试错法进行测量。这些方法耗时繁复，仅能达到 0.01mm 的分辨率，难以满足精密机械工作时对同轴度的要求。

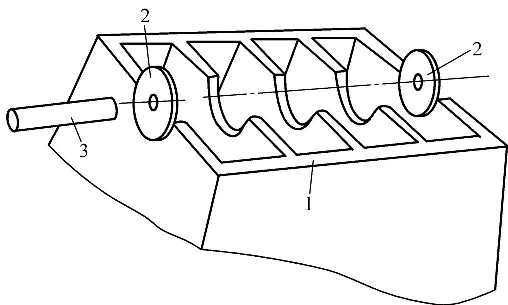


图 4-24　测量轴系工件同轴度
1—轴承座　2—定心靶　3—激光准直仪

大型柴油机轴承孔的同轴度，以及轮船轴系同轴度的测量均可用激光准直仪和定心靶来进行，如图 4-24 所示。在轴承座 1 两端的轴承孔中各置一定心靶 2，调整激光准直仪 3 使其光束通过两定心靶的中心，即建立了直线度基准。再将测量靶依次放入各轴承孔测量靶中心相对于直线度基准的偏移值，并可由电表指示。

**3. 用激光准直系统控制镗直孔**

用激光准直系统控制镗 125mm 炮筒内孔，如图 4-25 所示。炮筒锻件装在镗孔车床上，将镗杆移向旋转的炮筒。镗杆的结构如图 4-26 所示，激光束穿过通孔，与车床的旋转中心共线。四象限探测器装在镗头上，使镗杆在前进过程中保持一直线。当镗头偏离中心时，误差信号驱动一个液压伺服阀，该阀控制两个推力台使镗头回到中心位置。

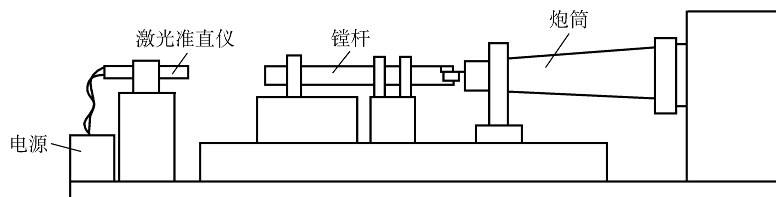


图 4-25　激光准直系统控制镗直孔

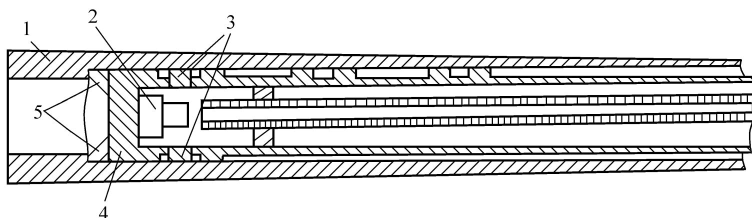


图 4-26　镗杆结构
1—炮筒　2—中心探测器　3—推力台　4—镗杆　5—镗刀

## 4.5　数字显微硬度计

数字显微硬度计是一种精密机械光学系统和电子部分组成而成的材料硬度的测定

仪器，它既能单独测定硬度，也能作金相显微镜使用，观察和拍摄材料的显微组织，并测定其金相组织的显微硬度。

## 4.5.1　数字显微硬度计的仪器构成

数字显微硬度计是在现有显微硬度计的基础上，配置数字摄像部件，视频信号通过与计算机匹配的图像捕捉卡实现图像的数字化，数字图像输入计算机储存、远程传输、打印输出等。设计编制实时数据测量软件，快速获得试样硬度测试数据，建立与测试软件相连的数据库。对测试参数与测试结果存档保存，便于分析处理。图 4-27 是其工作原理图。

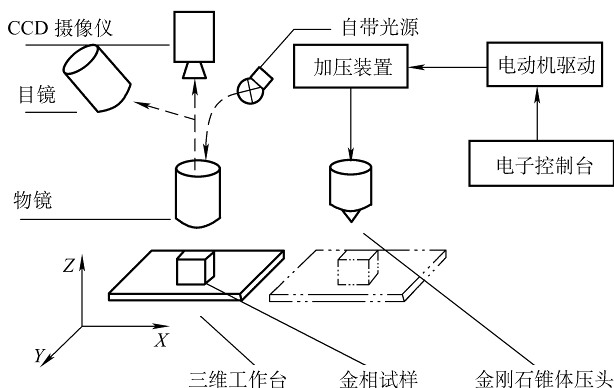



图 4-27　数字显微硬度计示意图

## 4.5.2　数字显微硬度计的工作方式

显微硬度试验是一种微观的静态试验方法，显微硬度计则是通过光学放大，测出在一定负荷下由金刚钻角锥体压头压入被测物后所残留的对角线长度来求出被测物的硬度，如图 4-28 所示，其基本步骤如下：

1）由于显微物镜位置和焦距都是固定的，故调焦是采取工作台上升，调整金相式样与物镜的相对位置（*Z* 轴方向）来进行。

2）调整纵横（*X*，*Y* 轴方向）位置，在视场里找出式样的需测部位。

3）粗调整 *X* 轴位置，使选用的测试部正好移到金刚石锥体压头下，然后按实验压力参数进行压痕。

4）粗调整 *X* 轴位置，返回物

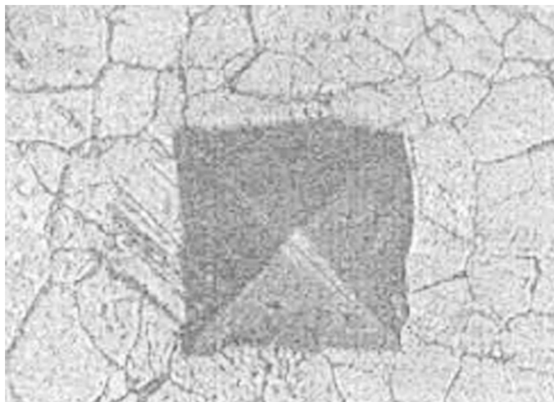


图 4-28　硬度测量

镜下的位置，进行观察、测量、计算。

### 4.5.3　数字显微硬度计的控制系统

控制系统硬件组成如图 4-29 所示，不仅电动机控制卡 DMC204 直接插在 PC 总线插槽上，它可提供 4 个步进电动机的高性能控制，还提供了功能强大的 C 函数运动库 Windows 动态链接库，可实时提供每轴的相对/绝对位置信息、运动中可变速度、加速度和减速度等。步进电动机采用两相混合式，其体积小，具有较大的静转矩，由于具有保持力矩，断电时运动轴也不易产生位移。

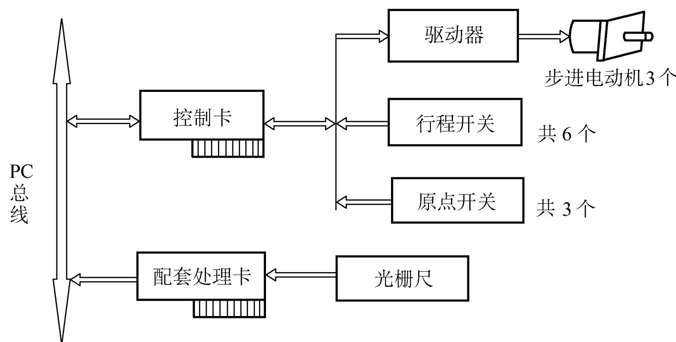



图 4-29　控制系统硬件简图

*Z* 轴步进电动机通过传动为 8 的蜗轮蜗杆与微调焦手轮相连，手轮转一圈，升降轴（*Z* 轴）移动 0.75mm，步进角度：1.8° ±0.09°，步进电动机脉冲当量：0.47μm/P，满足调焦精度要求，*X*，*Y* 轴方向的步进电动机脉冲当量：5μm/P。

光栅尺用于工作台位于原点位置时，通过 *Z* 轴上升来测量放在指定测量点的试样的高度，如图 4-30 所示，其作用是在物镜下拍摄金相图时确定工作台上升的极限位置（以免碰坏物镜）。

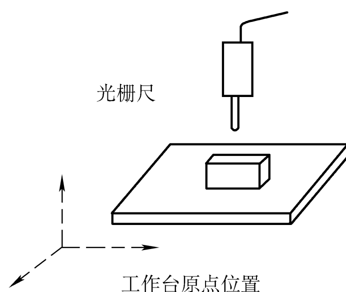



图 4-30　光栅尺与工作台位置示意图

PC 机通过界面软件，调用 DMC204 的运动库函数，运动控制由 DMC204 控制板处理，再由驱动器驱动步进电动机。该板控制多个运动轴以独立的形式进行点位运动、连续运动和回原点运动，它的多轴插补函数能以指定的矢量速度执行线形、圆弧、椭圆和插补运动。

### 4.5.4　数字显微硬度计的硬件部分

#### 1. 基本光路

为实现显微硬度计数字化，CCD 的安装位置有两种不同方法，一种是把 CCD 摄像头安装在目镜后面，但此时目镜出射的是平行光，所以摄像头必须要附加成像透镜，把出射的平行光在 CCD 靶面上成像；另一种方法是显微压痕经物镜放大后，直接成像在 CCD 靶面上。前者可以通过使用不同的镜头，对放大率进行放大或缩小（根据视场

角要求而定)。而后者结构简单、紧凑，有诸多优点，其光路示意图如图 4-31 所示，压痕位于物镜前焦面之外，经物镜成一实像，CCD 靶面与像平面重合。

**2. CCD 摄像头**

CCD 是电耦合器件，它由 $N \times M$ 个能够将光转换为电荷的光敏元列阵组成，并通过集成的外围处理电路实现电子扫描与多路传输，将光学图像在各光敏元上感光的电信号以标准信号制式输出，实际上是把光学图像“分割”成为 $N \times M$ 个单元。

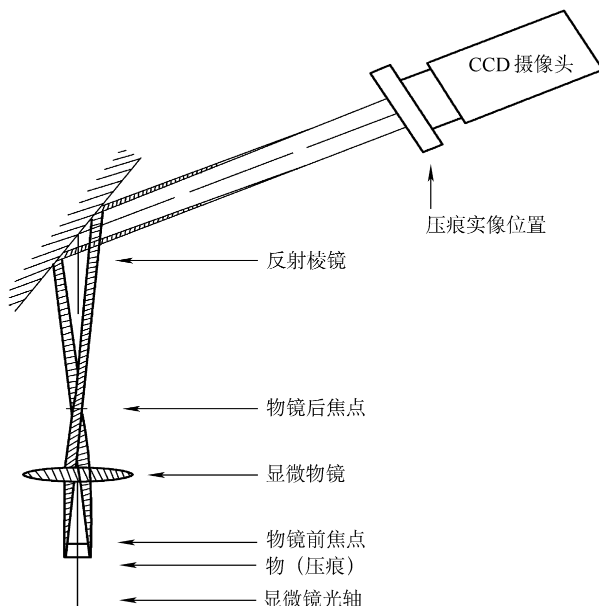


图 4-31　CCD 位置及显微硬度计光路示意图

数字显微硬度计的 CCD 为 ACE571 1/3″彩色摄像头，其基本参数为：有效像元数 41 万；感光灵敏度 0.8Lux，信号输出为标准 PAL/NTSC 制式；靶面尺寸 4.4mm × 3.6mm，光敏元列阵 740 × 555；各光敏元尺寸（像元中心到中心）为 $6.5 \times 6.5\mu m^2$。

**3. 摄像头机械调节**

设计加工的机械接口配件，把 CCD 固定在显微硬度计目镜位置，使物镜放大的实像成像于 CCD 靶面上。因考虑到物距、像距（即 CCD 靶面位置）、放大率之间存在相互联系，所以在设计机械接口时，必须使 CCD 靶面上下有调节机构，同时为方便最终统调，还需使 CCD 在平面内可微调。

具体地，在 CCD 摄像头标准的 CS 接口上接一套筒，套筒与目镜管滑动配合，使之可以利用原光路定位，滑动可以调节 CCD 靶面位置。固定 CCD 的固定架带有调节机构，以满足上述要求。

**4. 图像采集卡**

图像采集卡将摄像头得到标准电视 PAL 制式的模拟图像信号转换为数字信号，是实现摄像头和计算机之间的接口。我们选用的采集卡是 Aver-EZ 动静态图像采集卡，静态采集分辨率 640 × 480，动态为 320 × 240，15 帧/秒，PAL/NTSC 制式 AV 输入。由于选用的是动静态图像采集卡与 AV 输入端口，所以既可以以高的分辨率采集静态图像，又可以制作数字化的动态图像。采集卡操作界面为图视界面，对采集的图像以 JPG、BMP、AVI 等常见文件格式存盘保存。

## 4.5.5　数字显微硬度计的测试软件及数据库

功能测试软件以 VB 作为编程工具，全可视操作界面，功能齐全，使用方便，并连

接数据库，测试结果与测试条件存入数据库。

图 4-32 是软件流程图，测试过程为：①读入图像；②测出压痕对角线距离；③定标；④算出 HV。

对压痕图像测试过程中，实时显示二取样点的连线，使测量取点情况一目了然。另外，可设置多次测试取平均，以消除偶然误差。多次测量的测试取样点以不同颜色连线实时显示，便于对结果的分析讨论。

本系统的数据库为关系型数据库，对试样测试参数、测试结果、图像建档保存，并可以多种途径查询，使用非常方便。

内置的材料素材数据库包含：

1）HV 与其他硬度间的关系。

2）HV 与强度间的关系。

3）常用机械零件对应的硬度。

4）某一硬度范围内对应的不同材料。

5）相同材料经不同热处理后对应的硬度。

该测试软件与数据库的建立，对材料性能分析研究、数据查询提供了方便的手段，并有利于建立自己的数据档案。数据库的实施框图如图 4-33 所示。

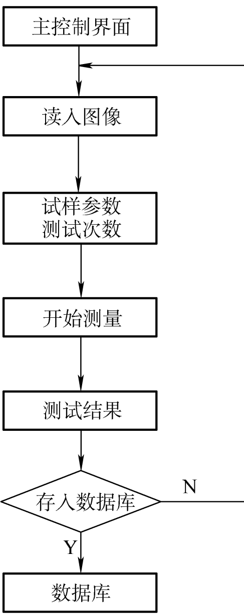



图 4-32　软件流程图

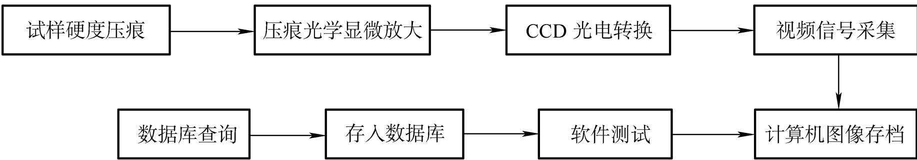



图 4-33　数据库实施框图

## 4.6　活塞外轮廓测量仪

活塞是内燃机实现能量转换的重要部件之一，其形状及加工精度直接影响内燃机的运行可靠性及输出功率。活塞的横截面形状及活塞头部与裙部的形线是活塞的重要设计参数，因此活塞型面的测量是十分重要的。

该活塞外轮廓测量仪可自动测量活塞外轮廓形线、椭圆度、大径偏角的精密仪器。具有测量精度高、操作简便、稳定可靠、对环境适应性强等特点。活塞外轮廓测量仪的技术指标见表 4-4。

**表 4-4　活塞外轮廓测量仪的技术指标**

| | |
|---|---|
| 测量范围 | 活塞直径 $D \leqslant 300$mm<br>活塞长度 $L \leqslant 600$mm |
| 测量行程 | 椭圆度 0 ~ 3mm<br>形线 0 ~ 3mm |

（续）

| | |
|---|---|
| 纵向分辨率 | 0.1mm |
| 角度分辨率 | 0.5° |
| 传感器分辨率 | 0.05μm |
| 传感器精度 | ±0.001mm |
| 椭圆度重复测量方差 | <0.02mm |

## 4.6.1　活塞外轮廓测量仪的工作原理与构成

活塞外轮廓测量仪主要用于测量活塞横截面椭圆度和活塞头部与裙部形线的锥度。椭圆度是指活塞横截面椭圆长轴与短轴之差；锥度是指活塞长轴方向纵截面中底部与头部直径之差。

活塞外轮廓测量仪的系统构成如图 4-34 所示，在测量过程中，如要测量活塞横截面椭圆数据时，调整测量架的高度，使测头对准所测截面，计算机控制步进电动机 1 带动回转工作台转动，光电测长仪将测得的数据传给计算机，从而得到活塞横截面的椭圆度和大径偏角测量数据；当要测量活塞纵向形线数据时，回转工作台不动，步进电动机 2 通过丝杠转动带动测量架沿工件纵向行进，从而得到活塞纵向形线数据。计算机分别对这两组数据进行处理，然后将处理结果以数据或图形的形式在屏幕上显示，也可送打印机打印或存入磁盘永久保存，需要时可随时调出。

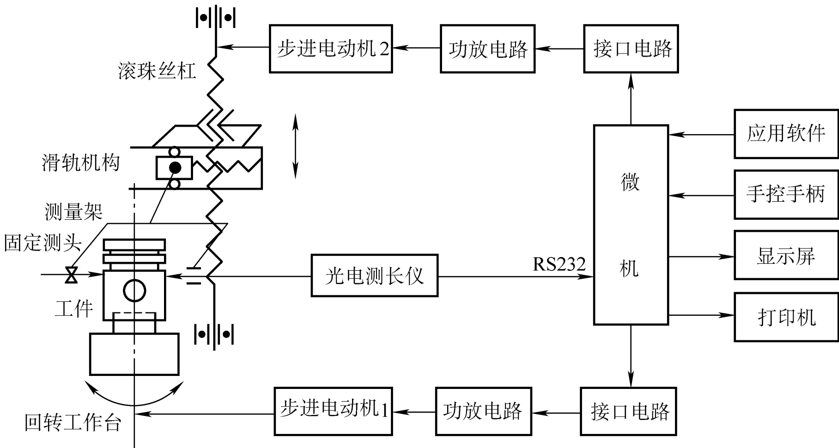



图 4-34　活塞外轮廓测量仪工作原理图

## 4.6.2　活塞外轮廓测量仪的硬件系统

系统硬件包括机械结构、计算机、传感器及控制部分等。

（1）机械结构　活塞外轮廓测量仪的机械部分主要由回转工作台、立柱、测量架、工作台等组成。

1）回转工作台。回转工作台的性能直接影响测量仪的测量精度和工作性能，是测量的关键部件，其作用是带动被测零件进行精密分度和作精确灵活的旋转运动。

回转工作台要求回转精度高；系统刚性好；振动少；耐磨；发热小；装配、调试及更换方便。所以回转工作台采用高精度的滑动轴承。

2）立柱。立柱是形线测量时的关键部件，它的作用是使电动机通过丝杠带动测头架沿导轨方向转动，从而使传感器、测量架沿工件纵向型面的母线上下移动，完成活塞形线的测量。立柱的传动件和支承件分别采用高精度的滚珠丝杠和滚动导轨以保证上下运动的精度。

3）测量架。测量架将导轨上的滑块与丝杠螺母连接在一起，使装在上面的浮动式的双测头装置及传感器能够灵活地运动。双测头装置与测量架之间采用滚动滑轨机构，以实现双测头的运动，其机构简图如图 4-35 所示。

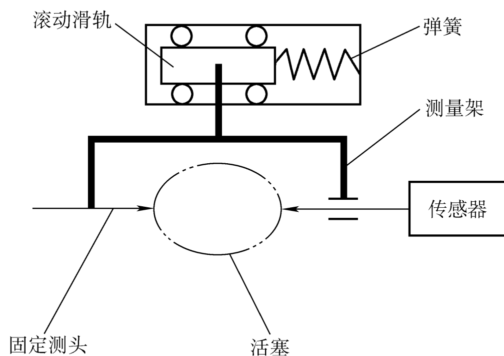


图 4-35　双测头单传感器机构示意图

4）工作台。工作台主要用于被测活塞的放置与定位。活塞以止口定位，由于不同活塞的止口不同，因此测量仪配备有止口胎系列，与被测活塞配套使用。

（2）传感器　测量仪的传感器采用一种新型数字化通用测量仪——光电测长仪，它除有传感器外，还带有数显表。其量程为 10mm，分辨率达 0.05μm，满量程绝对误差小于 ±1μm，性能稳定，无零漂，对工作环境无特殊要求，使用时如同千分表，调整非常方便。光电测长仪与微机采用 RS232 串行通信，通信口为 COM2，直接将测量数据传给计算机。

光电测长仪由光电传感器（光电测头）及光栅数显表两部分组成，光电测长仪的结构及工作原理如图 4-36 所示。将有关的光学及精密机械零件封装在一个壳体内形成光电测头，其外形像千分表，安装使用方法也几乎与千分表一样。活动框架的中央装有主光栅，框架的两端通过精密配合各连接一根小轴，轴线严格重合（达 μm 量级）。敏感元件的布局完全符合阿贝原则，因而保证了测量精度很高。

在主光栅背后安装了一套光学照明系统，前面装有一块指示光栅对着 4 个光敏元件。测量时，被测零件通过下端小轴末端的触头使光栅沿着小轴的轴线运动，4 个光敏元件分别送出 4 列正弦信号，相位互相差 90°，经过电缆传送到数显表。数显表的核心元件是超大规模集成电路的单片微机，如图 4-37 所示。4 路光电信号分别经过运算放大器、整形电路、微分电路和辨向电路进行可逆计数，同时光电信号经过 A/D 变换送入单片机，进行相位运算，求出莫尔条纹的细分数值，莫尔条纹的整数与分数组合在一起，乘以光栅常数，便构成实际测量值，通过数码管显示在面板上或通过 RS232 直接将测量数据传给计算机处理。

（3）控制部分　计算机控制段数据处理部分包括微机、控制接口板、步进电动机

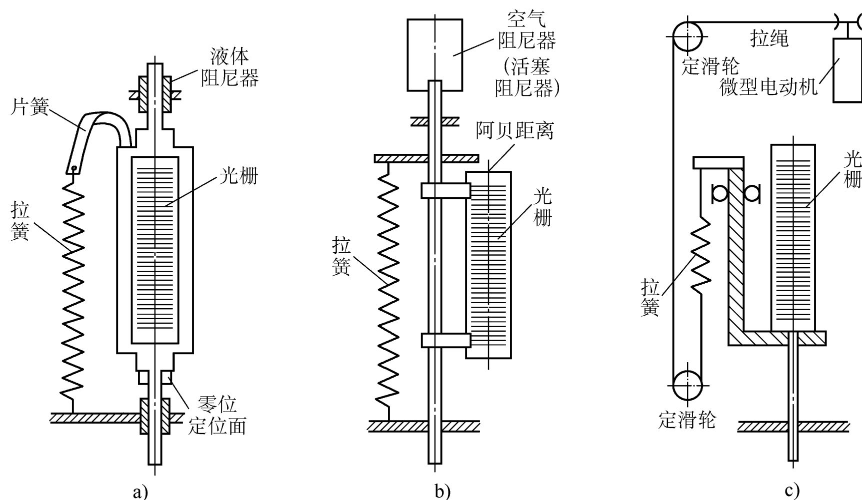



图 4-36　光电测长仪工作原理

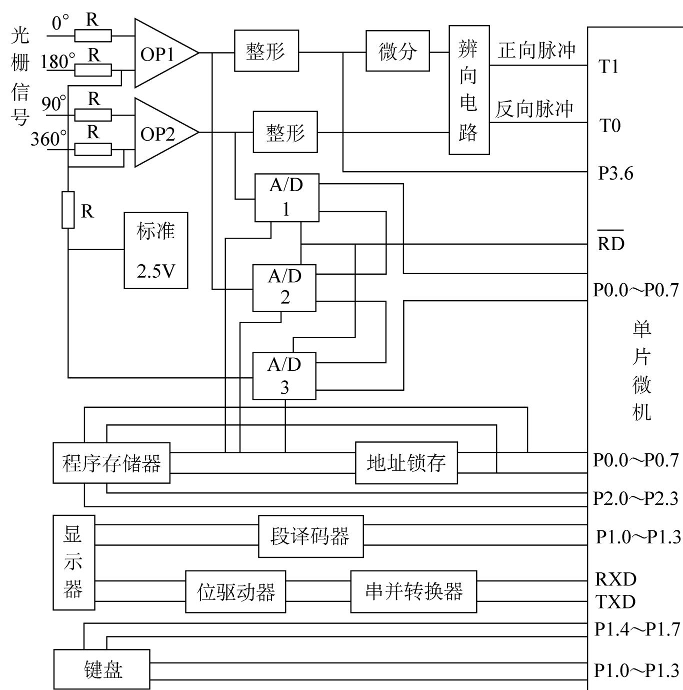



图 4-37　电测长仪电气框图

驱动器、电源等。它一方面控制整个测量系统的运动，另一方面用来处理传感器的测量数据。

控制接口板是连接微机与外部器件的交接部分，通过微机的扩展槽实现与微机之间的数据、状态和信息的交换。在本系统中，主要接受计算机发出的电动机控制信号，同时把电动机的工作状态送回计算机。接口板采用 8255 可编程并行口，信号输出全部

经过光电隔离。

步进电动机驱动器需要输入的信号有方向信号、脉冲信号和脱机信号。

### 4.6.3　活塞外轮廓测量仪的软件系统

测量仪的软件框图如图4-38所示，图中指引线指出了各功能之间的关系，通过菜单选项可以进入各层子菜单，例如，要测量椭圆度及大径偏角参数，则选椭圆测量，然后选择测量并绘图。又如要查看以前数据的绘图结果，则选形线测量，然后选择查查看测量结果，查看数据绘图。

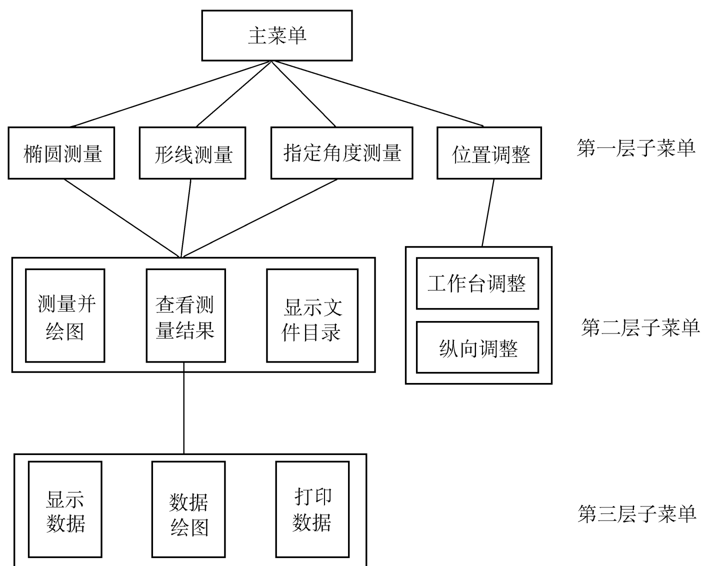



图4-38　软件框图

软件主要功能和特点是；

1）人机界面良好，支持键盘和鼠标操作。

2）自带汉字库，节省内存开销和硬盘空间，降低对系统的要求。

3）具有完善的测试和数据图形处理功能，操作灵活方便。

4）数据、图表均可显示、存储和打印。

5）系统的回转工作台和测头架的位置可以任意调整。

## 4.7　激光扫描声学显微镜

激光扫描声学显微镜作为一种新型高分辨率的无损检测仪器，具有实时成像的优点，可以广泛应用于航空航天、电子、生物医学、冶金、核工业及食物工业上，如结构陶瓷、纤维增强型塑料、IC和陶瓷芯片电容塑料封装、动植物活组织层析等等方面的无损检测。它可以准确、实时地检测非金属材料内部的缺陷尺寸，确定其所在位置，而且运用这些技术还可以获得各向同性、均匀的固体材料的杨氏模量、剪切模量、泊

松比及其他一些物理特性和结构特性。

## 4.7.1　激光扫描声学显微镜的工作原理

激光扫描声学显微镜的典型原理图如图 4-39 所示。样品放在工作台上，由压电换能器产生的高频连续平面波以一小角度入射，通过工作台和样品间的耦合液（常常用蒸馏水或惰性液体），最终，折射波透过样品（在样品内部，由于超声波传播需要介质，所以，遇到诸如气孔、缝隙、分层等缺陷时，部分被反射、散射、吸收），并在与入射声源相反的样品最上层表面产生了带有样品内部微观信息的微小动态波纹，如图 4-40 所示。

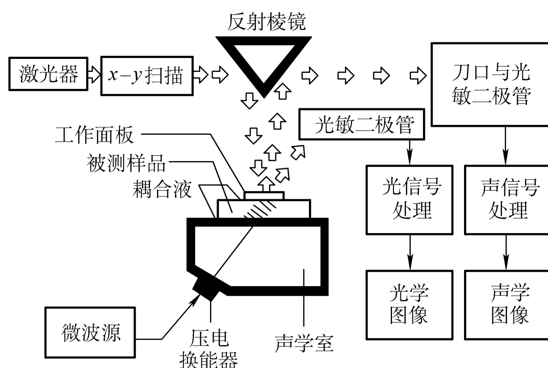



图 4-39　激光扫描声学显微镜原理图

如果样品表面是抛光的，那么动态波纹就对在上面聚焦扫描的激光进行调制。否则，就必须在样品上表面紧贴着半透明镜面的工作面板。当然，工作面板与样品间也要注入耦合液。这样，经过声光互作用（发生了纳曼-奈斯衍射和多普勒效应），反射光束中含有了样品内微观结构信息。由于声波振幅度很小，即 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ m 数量级，所以仅仅考虑 0 级和 ±1 级衍射光束。如果光敏二极管全部接受所有的反射光，它的输出电流全是直流，因为到达光敏二极管的光强不会随角的变化而变化，所以就必须在光敏二极管前放置一个诸如刀口（见图 4-39）的光缆，那么输出电流就含有直流部分和反映声波信息（样品信息）的交流部分，这样，CRT 检测器就可以以 1 帧/30s 的速度“读出”声振幅图像。

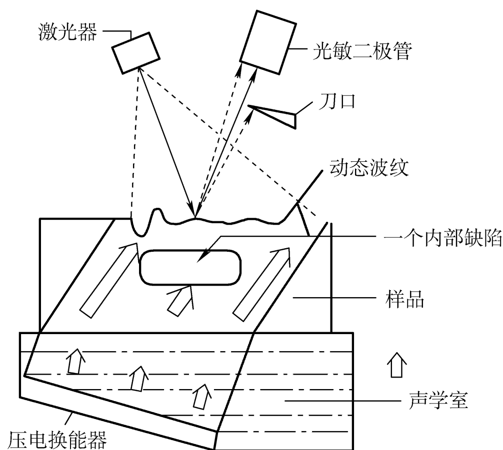



图 4-40　声光相互作用

激光扫描声学显微镜也可以产生声干涉图像。聚焦激光束在扫描过程中，由于声光互作用而产生多普勒效应，经过光敏二极管转换成的电信号与压电换能器产生的原始声波信号的电信号外差，在 CRT 监测器中就可以显示出带有样品信息的声干涉图像。同时，也可以相应得到关于样品信息的光学图像。

## 4.7.2 激光扫描声学显微镜的应用

**1. 电子陶瓷**

自激光扫描声学显微镜问世以来，国内外对电子陶瓷的力学（声学）性能参数作了较为详尽地研究。对于多层陶瓷电容器，如果内部存在诸如裂缝、脱层、针孔、分层、气泡、空洞等缺陷，会对使用多层陶瓷电容器的整机可靠性及寿命产生严重的直接影响，这对于把体积小、比容大等优点的多层陶瓷电容器应用于对可靠性和质量要求极为苛刻的航空、航天等国防领域是相当不便的。为此，在使用多层陶瓷电容器前就必须对之进行严格的检验。过去多层陶瓷电容器的传统检测方法主要采用破坏性物理分析技术，其主要特点是随机抽样和显微切片结合，不足之处显而易见。

**2. 生物医学领域**

观察生物体组织时不需要事先进行诸如着色、定色方面的样本预处理是激光扫描声学显微镜在生物医学领域的主要优势，同时，由于激光扫描声学显微镜不但能提供 1 帧/30s 的声图像，所以不但能够对活组织进行实时观察，而且还可以对这些生物体组织的弹性参数进行动力学分析研究。目前激光扫描声学显微镜已经成功地研究了动物肝脏、皮肤、老鼠大脑、雌性牛尿道层状结构。国外学者运用激光扫描声学显微镜对经过和没有经过刺激的青蛙肌肉进行了分析，研究了在肌肉中的声速传播特点和衰减率。他们还运用激光扫描声学显微镜对狗的皮肤进行了对比研究，根据所提供的声图像和弹性参数，得出了一系列重要发现。

**3. 电子材料、电子元件**

电子元器件常常是分层的，有很多接口。激光扫描声学显微镜对电子元器件特别是集成电路（IC）和陶瓷芯片电容的无损检测尤其实用，可以对集成电路引线焊接进行无损检测，并能获得高分辨率的声显微图像。从中可以发现：声图像清晰地看到了引线的好坏，而光图像比较模糊。

国外运用激光扫描声学显微镜对 IC 和陶瓷芯片电容塑胶封装进行了详尽的无损检测研究。由于在 IC 和陶瓷芯片封装过程中会存在焊接不良、空隙、微裂纹等缺陷，会在使用中过早地报废，有时还会造成严重后果。为此，必须对出厂的 IC 和陶瓷芯片进行严格检测。激光扫描声学显微镜还可以对 IC 塑胶封装进行三维检测，这样有助于提高产品质量，减少不必要的损失。

**4. 高级复合材料**

利用激光扫描声学显微镜，可方便地探测纤维增强型塑料中纤维的分层和错位。国外学者对含碳纤维增强型塑料内部的疲劳断裂、冲击破裂进行了探测，他从一个固定方向来观察一个八层的含碳纤维增强型塑料板，其中一层预先被人为设计成含有歪斜错位的含碳纤维瑕疵，用激光扫描声学显微镜可清楚地看到这个错位区域。因为激光扫描声学显微镜运用高频超声波，含碳纤维成了超声波散射体，这样，由于波的散射，图像中出现了许多暗线，这些暗线与预先给定的纤维错位方向一致。运用激光扫描声学显微镜进行无损检测中，声衰减不但取决于入射角而且取决于声波在含碳纤维增强型塑料样品中的传播方向，因此，只要选择好恰当地入射角和声波的传播方向，

含碳纤维增强型塑料样品中的缺陷就容易检测到。

# 4.8　数字微镜器件

数字微镜器件（DMD）是利用微机械加工技术在芯片上制作的高密度快速微反射镜阵列，并通过微电子技术控制各子反射镜的开关位置，实现空间光的调制。DMD 是微机械与微电子相结合的典型，由美国德州仪器公司的科学家发明。DMD 器件可以用于制作监视器、大屏幕投影电视等。与目前传统的阴极射线管（CRT）及液晶光阀相比，DMD 具有高亮度、高清晰、低成本等优点，具有巨大的市场潜力与广阔的应用前景。

## 4.8.1　数字微镜器件的设备结构

DMD 的单元反射镜结构和电极如图 4-41 所示，在每个 CMOS 静态 RAM 上面有两个寻址电极和两个搭接电极，其电压值由静态 RAM 单元中的数据控制，在电极上面是反射镜支撑杆、扭臂铰链和铝合金反射镜。微反射镜有三个状态，工作时有两个状态。与静态 RAM 内数据相关的静电力可以将反射镜绕扭臂铰链倾斜 +10°（即开态）与 -10°（闭态），从而可以对入射光进行调制。第三个状态是反射镜处于水平位置的状态，这种状态仅出现在 DMD 未通电或被复位以后。

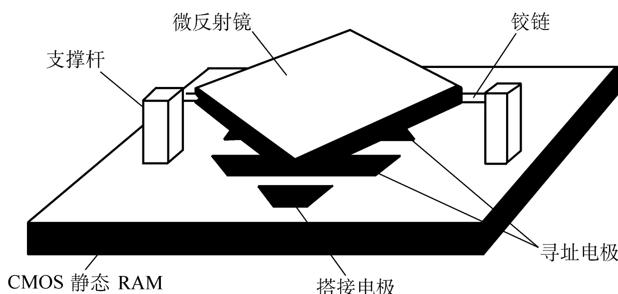



图 4-41　DMD 单元结构示意图

图 4-42 所示为 DMD 反射镜的转角与寻址电压的关系曲线。由图可见，要达到最大偏转角 10°（由具体结构空间决定），其寻址电压必须超过阈值电压（为 15 ~20V 左右），但为了与标准的 CMOS 寻址电路兼容，通常希望达到 5V 的操作电压。为此，将扭臂铰链梁与搭接电极都接上一个负的偏压，可使寻址电压大幅度降低。

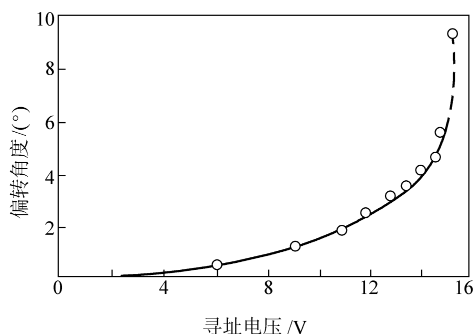



图 4-42　DMD 反射镜的转角与寻址电压的关系

DMD 反射镜、电极等结构的制作工艺与下层的 CMOS 电路是完全独立的工艺。其制作过程是首先在 CMOS 寻址电路氧化物保护层上刻蚀电极接触区，然后溅射沉积铝合金，使之在刻蚀槽内形成欧姆接触，

再使用等离子体刻蚀铝合金，形成电极结构，接着覆盖 2～3μm 厚的有机衬垫层，再刻蚀支撑杆开口形成图 4-43a 所示的结构。在衬垫上溅射沉积一层 50～100μm 厚的铝合金而形成铰链，采用等离子体沉积法制作一层掩膜氧化物，并刻蚀除铰链以外的区域，溅射 0.3～0.5μm 厚的第二层铝合金横梁结构即反射镜，再用等离子体沉积法制作掩膜氧化层，刻蚀掉掩盖于区域之上的横梁金属层，形成如图 4-43b 所示的结构。完成上述制作以后，铰链、横梁及支撑杆上都有氧化物覆盖，用等离子体刻蚀氧化物覆盖层，对横梁下的衬垫进行各向同性刻蚀而形成空隙，最终的结构如图 4-43c 所示。

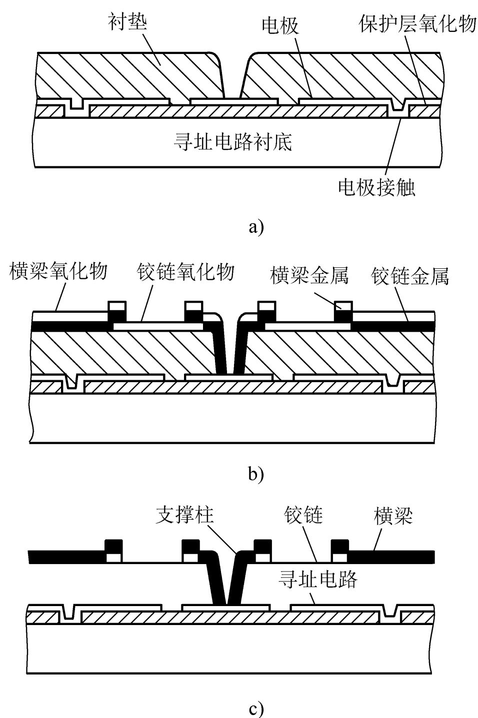



图 4-43　DMD 的制作工艺过程
a）刻蚀衬垫　b）刻蚀横梁金属　c）最终结构

## 4.8.2　数字微镜器件的应用

目前 DMD 主要应用于投影显示的领域。图 4-44 为 DMD 投影显示的原理图。光源与 DMD 器件的表面成 70°倾角入射，即与其表面法线呈 20°角。当微反射镜倾斜 +10°角时，其反射的光线可以进入投影透镜的孔径，由投影透镜投射于屏幕上，当微反射镜倾斜 -10°时，反射光线与投影透镜的光轴成 -40°角，偏离出透镜的孔径。同样，当微反射镜处于复位状态，即保持水平时，反射光线偏离透镜光轴 -20°，也不能进入透镜孔径。由此可见，当微反射镜处于开态（即 +10°倾角）时，反射光线由投影透镜投影于屏幕上，该微反射镜所对应的像元为亮；反之，当微反射镜处于闭态时（即 -10°倾角）时，该微反射镜所对应的像元为暗。像元的灰级是通过微反射镜摆动的脉宽调制来实现的，像元的亮度值越大，即该像元所对应的微反射镜在一个周期内处于开态的时间越长，

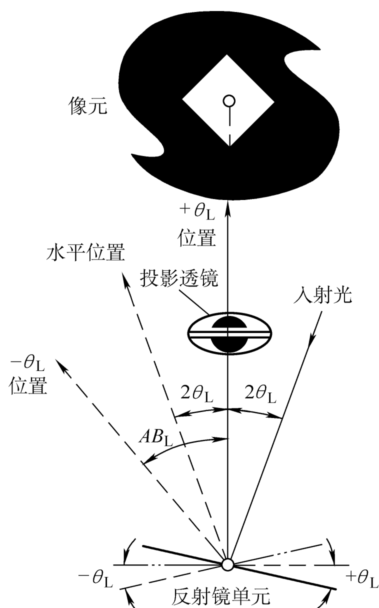



图 4-44　DMD 的投影显示原理

例如，对通常的 8 位系统而言，有 256 个灰度等级，当某像元的灰级值为 128 时，该像元所对应微反射镜处于开态的时间为整个摆动周期的一半。由于人眼察觉不到非常快的光强波动，因此当摆动周期很短，即频率很高时，人眼接收到屏幕上各像元的亮度为光强的时间平均值，即灰度图像。

图 4-45 为 LED、CRT 和 DMD 投影显示系统结构原理图，其中图 4-45a 为液晶投影显示系统（LED）的结构原理图。光源发出的光由三片滤光镜滤出红绿蓝三元色光，分别入射到各自的液晶光阀上，由液晶光阀控制每个像元红绿蓝三元色的强度，再由统一透射投影于屏幕上。图 4-45b 为阴极摄像管（CRT）投影显示的结构，红绿蓝三个 CRT 通过各自的投影透镜由一面大反射镜反射投影于屏幕上。图 4-45c 为单片 DMD 投影显示的结构，光源发出的光由聚光镜汇聚，通过同步旋转式滤色轮后，入射到 DMD 芯片上，由 DMD 反射后经投影透镜投射于屏幕上。相比较而言，大部分的 CRT 投影显示系统都是后部投影式的，而当前的 LCD 投影显示大多是前部投影式的，DMD 不仅可以应用于前部投影的场合，也可以应用于后部投影的场合。此外，DMD 显示系统效率至少比 LED 同样的显示系统高 2 ~ 3 倍，而 CRT 由于受到荧光物质发光效率的限制，亮度也不高。同时 DMD 还具有分辨率高、与 VLSI 工艺相兼容、有利于大批量生产、成本低等优点，在投影显示领域中的应用前景极为诱人。

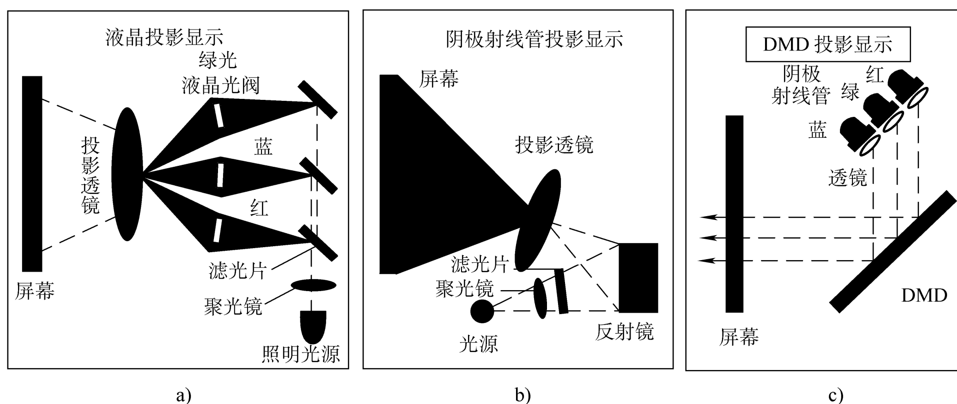



图 4-45　LED，CRT 和 DMD 的投影显示原理

a）液晶投影显示结构　b）阴极射线管投影显示结构　c）DMD 投影显示结构

## 4.9　激光微束装置

利用激光亮度高、光谱纯、可调谐、发散角小等其他光源没有的特点，将激光束用光学系统加以聚焦，形成非常细的光束，光斑直径小到几微米，甚至十分之几微米，称为激光微束。理论上讲，聚焦后的光斑直径可以小到所用激光波长的一半。例如，氩离子激光波长是 0.488μm，理论上可聚焦到光斑直径为 0.244μm，显然所用激光波长越短，聚焦光斑直径就越小。

激光微束可以对细胞靶体进行精细而巧妙的显微外科手术，这种显微外科手术较

常规显微操作因具有定位准确、操作简便，可对细胞靶体进行选择性损伤而不损伤其领近部位等优点而越来越受到生物、医学和化学界的注意，至今已发展成为激光生物学中一个重要领域。

激光微束照射可用于细胞生物学和细胞遗传学的一些基础研究，在分子遗传学基础上，发展起来的新兴科学遗传工程是在分子水平上对 DNA 遗传物质进行人工操作，以改变生物本性。由于遗传工程是在体外进行人工操作，可以完全摆脱传统有性生殖过程和种属的限制，实现种间遗传物质的交流，甚至可以把动物、植物、微生物乃至人的基因重组在一起。遗传工程在定向改变生物方面具有预见性和准确性．从而为人类创造和培育出有用的动物、植物和微生物新品种，及治疗人类遗传病提供了前所未有的有效手段和无限美好的前景，因此，世界各国都非常重视遗传工程的发展。

## 4.9.1　激光微束装置的组成

激光微束装置主要由激光器、显微镜系统及监控系统三部分组成。

红宝石、氦、氖、氩离子、氮分子及有机染料激光器均可作为光源，也可用准分子激光器。在图 4-46 中采用的显微镜，既可将激光束聚焦成激光微束，又可在照射以后立即观察和记录微束的效应。尤其应用相差显微镜可以更清楚地观察活细胞的细微结构，比较理想的激光微束系统，采用蔡司显微镜的相差 neofluar 物镜聚焦。激光束经 45°倾斜的二色分光镜成直角向下反射，进入显微镜系统到物镜。同时二色分光镜将生物样品的物像透射到观察和记录系统，而阻止激光微束在样品上的杂散光，以利观察和记录。其中采用照相机、摄影机或电视摄像机和监视器等来实现观察和记录。实验过程中，样品的动态变化，特别是辐照部位的动态变化可由目镜或电视荧光屏上连续观察，也可用摄像机作连续记录。

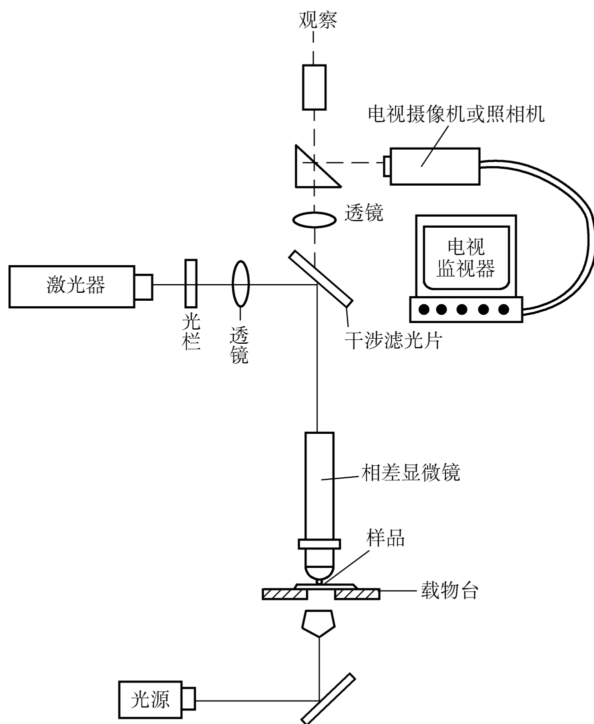


图 4-46　激光微束装置

## 4.9.2　激光波长的选择

激光微束采用的激光系统，根据所需的特定波长可有各种不同的结构。例如，为

研究核酸的光谱待性可选择 265nm；研究蛋白质的光谱特性可用 288nm 的紫外激光；研究细胞生物色素可选择 530nm、488nm 和 514.5nm 波长的激光，如果仅仅是利用激光能量辐照细胞，以便引起细胞某个局部的作用，则可选择红宝石激光。

目前可供应用的激光器有 1.06nm 的钕激光器，如 Nd-YAG 激光器，经二倍频可得到 530nm 的激光，四倍频可得 265nm 的紫外激光。有波长随工作物质种类和浓度不同而变的有机染料激光器，以及红宝石激光器等。

图 4-47 所示的点式激光微束系统采用了 Nd-YAG 激光器，输出激光经三倍频变为波长为 355nm 的紫外激光，脉冲能量为 1mJ，束径小于 0.5μm，并且用 He-Ne 激光器来提供指示灯。

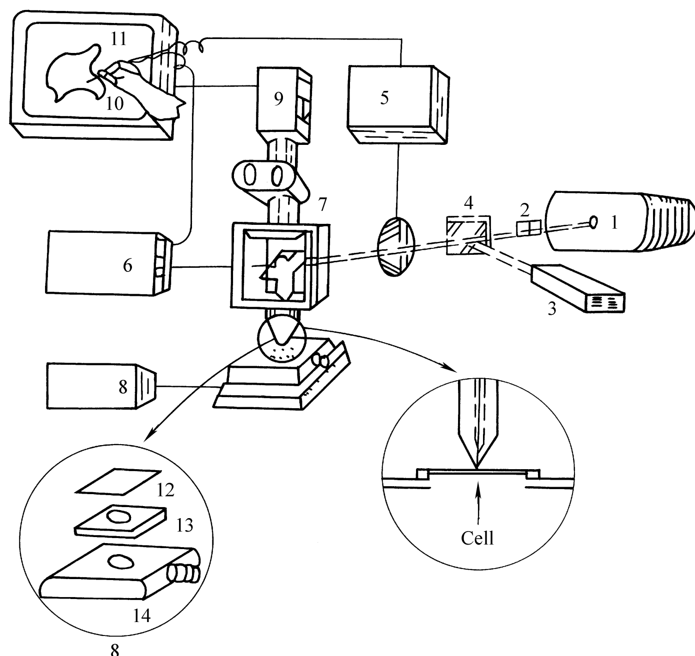



图 4-47　Nd-YAG 激光微束系统

1—Nd-YAG 激光器　2—倍频器　3—He-Ne 激光器　4—分束器
5—电子快门控制器　6—光束偏转器　7—显微镜　8—显微镜台自动控制器
9—电视摄像器　10—电视荧光屏　11—光笔　12，13，14—样品盘

细胞样品放入石英盘中，样品位置可以在电视屏幕中显示。用光笔指示转移点，通过显微镜台自动控制器使样品细胞的特定点移动到激光微束下，以便瞄准照射。将微束系统与微机结合起来的一种激光精密加工系统如图 4-48 所示。其基本构成为激光器、照射位置控制、图像处理三个部分。

在进行激光微加工时，要保持细胞活体状况，照射强度应充分低，对生物体不能有丝毫损伤，其主要原因是生物体分子和组织吸收激光而产生热、压力和光化学反应等，由此可能造成生物体的组织被切开和蒸发。同时，必须将照射的激光束聚焦到远小于细胞的大小，其照射位置也必须精密控制。

要将照射的激光束正确引导到细胞部位，必须有精密的导光技术。该系统采用数值孔径为 0.4mm，对紫外区域透射率高的物镜的光学显微镜。控制聚焦激光的位置有两种方法，或调节试样，或调节光束自身。为使透镜的像差控制在最小限度，并使聚焦激光经常保持恒定状态，调节光束自身是行不通的。所以，用压电元件电动机使显微镜载物台作二维移动，以实现样品位置的调节。这种压电元件确认移动精度在 1μm 以下。

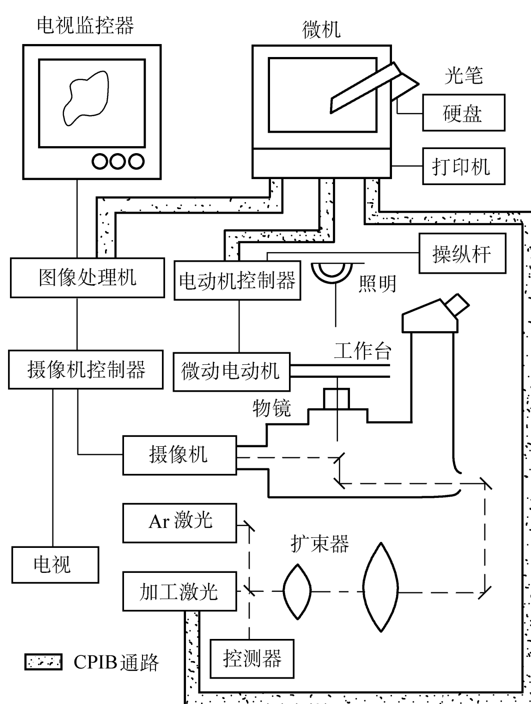


图 4-48　细胞微细加工用激光精密激加工系统的框图

待加工的生物体细胞的显微像由 CCD 摄像机摄录，并由电视监控器映出，也可送入图像处理机进行处理。图像处理包括一般的累计、相减、加强等处理外，还有细胞图像边用电视监控器监视，边指定照射激光的位置，及向该位置移动显微镜载物台在内的一系列机械动作的精密控制。

整个系统中，激光、控制照射位置及图像处理都由一台微机进行控制，实验者只需进行试样的调节和指定激光的照射位置，就能实施所需的精密细胞加工和手术。

在激光微束装置中，激光器和显微镜是必须的，其他装置则是为了便于观察和获得精确的结果而加的附加装置。

照射强度达到一定程度后，激光照射可引起生物体组织变性，甚至被切割。激光的热效应和压力效应是两种基本效应，一般认为，连续激光照射主要是热效应，而脉冲照射除了热效应外，还存在压力效应。入射的单脉冲激光照射生物组织的过程中，受照的组织吸收了激光能量后被加热继而汽化。而在组织汽化之前，组织首先被激光融化，因而形成气相、液相、凝相三相共存的状态。在气相和凝相之间的液相是瞬时形成的，气体分子反冲动量的变化所产生的压强把液体推向边缘的同时激光的热效应又把该部分液体蒸发、汽化。所以，在达到稳态以后，相位边界将以恒定的速度向深部组织移动。

将激光俘获法与激光精细加工两技术结合起来，可以对细胞进行俘获、转移、回转、切断、穿孔、移入、移植、融合等几乎全部细胞操作，并可通过使用激光进行非接触、安全的远距离控制。

## 4.10　激光扫平仪

激光扫平仪是在传统的光学扫描仪的基础上发展起来的一种激光扫描仪器，它能提供一个水平基准平面，可以通过目视或探测器在一定的半径范围内控制任一点的高度，具有很高的扫平精度和更远的作用距离，使用方便、灵活，工作效率大大提高。它在各种建筑施工、平整场地、机场建筑等施工工作中得到广泛应用。

### 4.10.1　激光扫平仪的工作原理

激光扫平仪主要是由激光光源、回转五棱镜及安平底座等几部分组成的。图 4-49 是它的结构原理图。

激光经扩束以后，由旋转五棱镜偏转 90°出射。如果五棱镜绕激光光轴旋转，则出射光束扫描出一个与光轴垂直的平面；如使激光光轴为铅垂方向，这个扫描平面即为水平面。

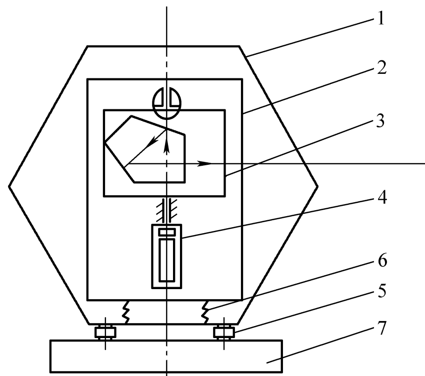



图 4-49　激光扫平仪的结构原理

1—外壳　2—内主体　3—旋转五棱镜　4—激光器及扩束系统　5—自动安平装置　6—粗调平装置　7—底座

实际的激光扫平仪中，是通过调整内主体的水平来保证激光光轴的铅垂的。调平时，先用粗调装置把内主体调整到自动安平装置的工作范围内，然后由自动安平装置自动找平。这样，就可以把激光扫描平面作为测量或控制的基准平面，根据目标点处的光电接收器所收到的位置信号来确定目标所在面偏离水平面的情况。

### 4.10.2　激光扫平仪的类型

根据激光扫平仪的工作原理，大致可将扫平仪分成三类：水泡式激光扫平仪、自动安平激光扫平仪和电子自动安平扫平仪。

**1. 水泡式激光扫平仪**

结构原理如图 4-50 所示的 SJ2 型激光扫平仪，是一种结构较简单、成本较低的水泡式激光扫平仪，是适宜于建筑施工、室内装饰等施工工作的普及型仪器。激光二极管 2 发出的激光，经物境 1 后得一激光束，该激光束再经五角棱镜 6 后，分成两束光线，一束直接通过，另一束改变 90°方向，仪器的旋转头由电动机 4 通过传动带 3 带动旋转，使形成一个扫描的激光平面，仪器上设置有长水准器 5，用于安平仪器。

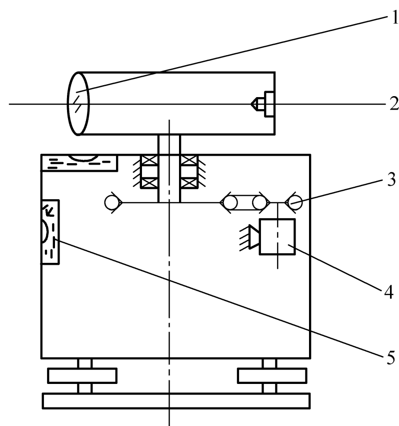



图 4-50　SJ2 型激光扫平仪

1—物镜　2—激光二极管　3—传动带　4—电动机　5—长水准器

### 2. 自动安平激光扫平仪

SJZ1 型自动安平扫平仪的结构如图 4-51 所示，它利用吊丝式光机补偿器，以达到在 ±10′范围内自动安平的目的，不论仪器如何倾斜，在补偿范围内将始终保持扫描出的激光平面处于水平面内，这种仪器适合于振动较大的施工场地。

仪器工作时，发光二极管 1 发出激光经由吊丝悬挂的物镜 3 后，再经由电动机 4 带动而旋转的五角棱镜 5 而扫描出全方位水平激光基准面。仪器中的电子线路，可改变电动机转速，并达到无级变速的目的。

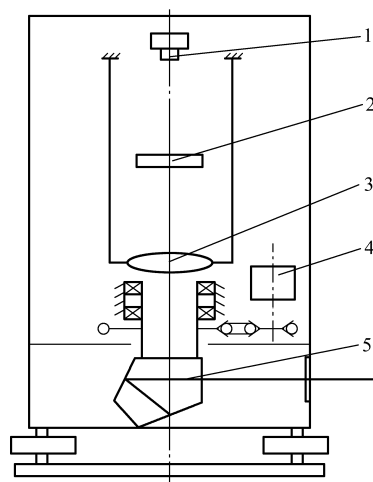



图 4-51　SJZ1 型扫平仪
1—发光二极管　2—透镜　3—物镜
4—电动机　5—五角棱镜

### 3. 电子式自动安平激光扫平仪

光机式补偿器结构相对简单、成本较低和具有一定的抗振性能等优点，但由于其补偿精度随补偿范围的增加而降低，一般补偿范围都限制在十几分之内。近代发展的电子自动安平原理，使安平范围可扩大至 10°左右，并且具有较高的稳定性和补偿精度。

电子自动安平系统一般由传感器、电子线路和执行机构组成。水泡式传感器由玻璃水泡内充有导电液的类似于一般气泡式水准器的元件为主体，玻璃管外涂有金属覆盖层，并形成两个对称的电极（见图 4-52），两个电极间相应为两个电阻 $R_1$ 和 $R_2$。当气泡居中时，电阻 $R_1 = R_2$；当水泡倾斜时，气泡发生位移，从而破坏了两个电阻的平衡状态，即 $R_1$ 和 $R_2$ 不相等，从而使与传感器电路组成的电桥失去平衡，并产生相应的电压输出，将输出信号经电子处理并放大驱动执行机构，使伺服电动机产生相应的正转或反转，保持电桥平衡，也就是达到了电子自动安平的目的。传感器除用电阻的方式外，也有用电容或电感的传感元件。

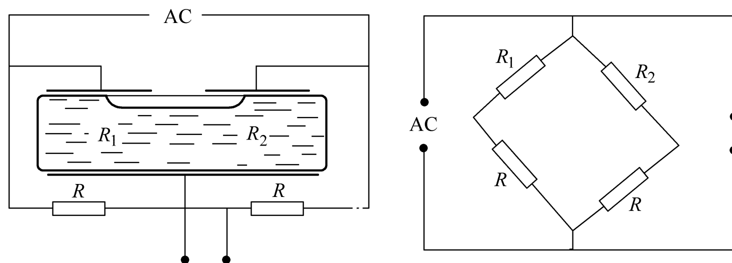



图 4-52　电子补偿器

## 4.10.3　激光扫平仪的工程应用

在工程机械中，经常要涉及地面平整的问题，如平地机平整地面、推土机平整路

面等，大都要求所平地面为水平。而在另一些场合，地面的水平度将对后续工作产生决定性的影响，如盐池的平整，池面的水平度将直接影响盐的质量和产量。在平整盐池时，传统的做法是机械先工作大致推平，然后用放水观察、人工修补的办法来修平，这样不仅使平整工作效率低、周期长，而且池面的质量也难以得到很好的保证。如果使用激光扫平仪配以自动反馈闭环控制系统，这些问题就能得到极好的解决。

如图 4-53 所示，激光扫平仪调平后固定在待平池面的中央，光电接收器（采用光电池阵列）与工作铲刀固定联结，这样接光点的位置就反映了地面的相对高度，根据这一相对高度就可判断该处是“高点”或“低点”及高低的程度，通过闭环控制系统相应地调整铲刀的高低位置，以削去高出的部分或补平低下的部分，实现地面的自动平整。

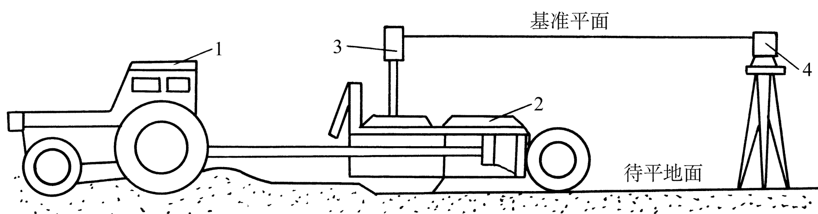



图 4-53　激光校准盐场平池机的工作原理

1—牵引拖拉机　2—平地机主体　3—激光接收机　4—激光扫平仪

以上测量、控制、铲刀升降等一系列动作都是在整机运行过程中实时进行的，所以可以大大提高工作效率。同时，激光扫平仪和光电接收器均有很高的精度，从而使最终控制精度得到很好的保证。

## 4.11　数字化超声波探伤仪

超声波探伤是无损检测的一种重要方法，广泛应用于铁路机车检修、船舶制造、压力容器检测等众多领域。传统超声波探伤仪类似于早期的示波器，只能简单地显示回波信号波形，测量结果只能通过数网格进行人工读数并需经过许多中间计算环节才能得到最终结果，所以测量精度低，误差较大，测量过程复杂，探伤波形也不易保存，难以作进一步分析。另外，根据超声波探伤工艺，检测某工件前需在特定的标准试块上对探伤仪进行初始调节。因此，每台探伤仪每次外出探伤只能检测一种工件，工作效率较低。

计算机技术的发展使得数字化超声波探伤仪具有探伤数据的采集、存储和运算功能，实现了探伤过程中的缺陷自动判定和读出，缺陷位置和当量值的显示，以及探伤结果存储、回放和打印输出，解决了超声探伤的可记录性问题，并减少了人为因素影响，提高了探伤结果的可信度。除此之外，可利用各种数字信号处理技术提高缺陷的识别能力和定量水平，并为各种超声成像检测打下了良好的基础。

## 4.11.1　数字化超声波探伤仪的基本结构

超声波探伤仪的基本结构框图如图 4-54 所示。探伤仪由同步电路、发射电路、接收电路、时基电路、显示器、电源和超声波换能器等几个部分组成。

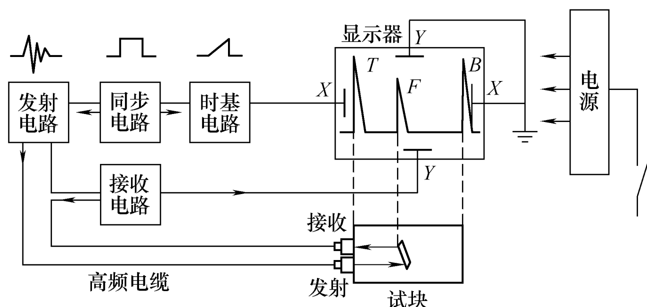



图 4-54　超声波探伤仪基本结构图

1）同步电路。产生使整个仪器协调工作的同步脉冲信号，同步触发发射电路、时基电路及闸门电路等部分，以便在显示屏上稳定地显示所需观察的超声回波脉冲。

2）发射电路。产生高压（负）脉冲，激励超声波换能器产生高频振荡，从而形成脉冲超声波，经耦合层进入被检构件和材料。

3）接收电路。从超声探头接收到的微小超声信号，经压电晶片转换为微弱的电脉冲信号，经接收电路放大后显示在示波器上。常规超声波探伤仪接收电路由衰减器、高频放大器、检波和视频放大器等几个部分组成。调节衰减器实际上是调节放大器的增益，以便使所观察的回波以合适的高度显示在示波屏上。

4）时基电路。实际是方波形成电路和锯齿波形成电路，产生的锯齿形电压波加到示波管的 $X$ 偏转板上，以使光点从左到右重复扫描，从而形成脉冲回波显示。光点扫描的速度（时间）要与声在被检工件中传播距离（时间）相对应。

## 4.11.2　数字化超声波探伤仪的系统组成

数字化超声波探伤仪采用单片机智能检测技术，系统由主、从 CPU 及相应功能模块组成，如图 4-55 所示。

主、从 CPU 均采用 8031 单片机。其中，主 CPU 及相关模块用于采集、存储探伤回波波形并根据探伤工艺对采集的波形进行处理及其相关分析，管理键盘和微型打印机等，如及时发现报警闸门中的损伤点，测量某一回波的幅值和声程，进行工作模式切换等；从 CPU 及相关模块用于控制示波管显示中文菜单、回波波形、测量信息、探测结果、报警闸门、可移动标尺等。主、从 CPU 按照协议通过通信模块进行信息交换。

主 CPU 对回波信号进行采集，由于回波信号的脉冲尖峰非常窄，一般只有 0.6 ~ 1.0μs 左右，所以数据采集速度要求非常高，一般需达 10M 以上（0.1μs 一个采样点）。本系统采用了 CA3318 高速 A/D 芯片进行数据采集；采用 HM 62256-60 进行瞬时

数据存储；并利用 74LS 161 及 74 LS 157 等芯片构成 DMA 控制器进行存储单元的地址修改，提供相应的读写控制信号，从而满足了信号高速采集的需要。

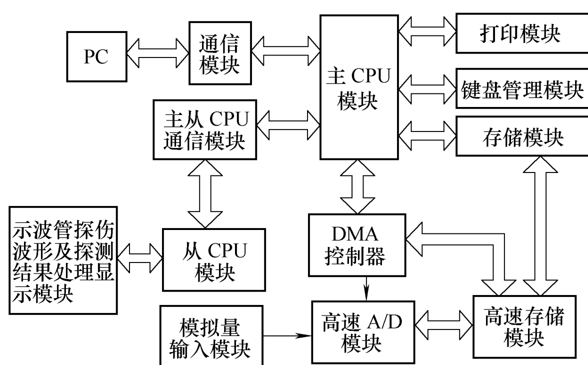


图 4-55　数字化超声波探伤仪系统功能模块

由于采样速率高、回波间隔长，一帧波形的采样数据量高达 30KB 以上。为了实现多帧存储，本系统采用了两类存储器。其中，瞬时数据存储采用一片 HM 62256-60 高速存储芯片；长期数据存储则采用了三片 HM 628128-100 常规存储芯片，可保存十帧以上波形数据，并都具有掉电保护功能。利用示波管扫描间隙将瞬时数据从高速存储器转存到常规存储器中，从而成功地解决了实时采集与数据存储之间的矛盾，数据还可通过通信模块传送到 PC 机作进一步处理。

## 4.11.3　数字化超声波探伤仪的数据采集

该系统数据采集采用了高速 A/D 芯片 CA 3318，最高转换速率可达 15MHz；但单纯提高 A/D 转换速度并不能有效地提高系统的数据采集速度。8031CPU 在主频 6MHz 时执行一条指令至少需要 2μs，所以用软件控制 A/D 转换就无法满足系统连续高速采集的需要，出现了数据采集通道的“瓶颈效应”。为了消除“瓶颈效应”，本系统采用了全硬件的控制方法，用 74LS 161 及 74LS 157 等芯片构成 DMA 控制器来产生总线信号及 A/D 启动信号等控制信号，并保证各信号时序上的协调，电路原理框图如图 4-56 所示。

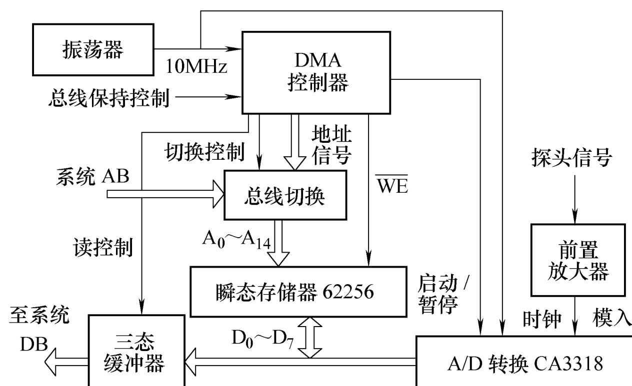


图 4-56　高速采集电路框图

在采样期间，总线进行切换，由 DMA 接管总线控制权，74LS 161 及相关电路产生高速 A/D 芯片 CA3318 的启动信号、瞬时存储器 HM 62256-60 的地址信号 $A_0$ ~ $A_{14}$ 及写

信号$\overline{\text{WE}}$，并可进行地址信号的修改，控制一帧波形的采集结束。采集结束时发出中断请求信号通知主 CPU 重新接管总线。一帧波形采集期间，不需 CPU 参与，消除了数据采集通道的“瓶颈效应”，CPU 可进行其他工作，如数据的分析与处理，从而也提高了 CPU 的工作效率。

图 4-57　采集系统前置放大器电路图

探头接受到的回波信号需经前置放大器放大后送 CA3318 进行 A/D 转换，而普通放大器的动态响应速度及频带范围均不能与此处的尖峰回波脉冲相匹配，所以本系统采用分立元件自行设计了一前置放大器，其电路如图 4-57 所示。

## 4.11.4　数字化超声波探伤仪的系统软件

该仪器的系统软件采用结构化、模块化的程序设计方法，各模块均有一定的独立功能，程序结构清晰，便于系统的功能扩充和维护。

（1）显示模块　本系统显示模式多，显示内容丰富。可显示中文菜单；显示回波波形；显示报警闸门、可移动标尺；显示测量结果等。而且，在不同的工作模式下显示的内容也不相同。系统采用了一片 8031 作为从 CPU，用从 CPU 及其相关模块来控制显示，其中汉字显示采用笔画法，并生成了专用字库，使得汉字显示清晰、美观，易于控制。

（2）通信模块　该模块分成两部分。一部分用于主 CPU 和从 CPU 之间的并行通信，双方按照一定的协议进行通信，传送的信息包括测量结果、标尺移动量、报警闸门调整量、菜单号等；另一部分用于主 CPU 与 PC 机的串行通信，将探伤波形及探伤结果等相关信息传送至 PC 机做进一步分析、处理或存档，如在 PC 机上显示工件和伤痕的位置模拟图；再现或比较多帧回波波形；局部放大回波波形等。

（3）键盘管理模块　系统扩展了一个 6×6 的小键盘，分成功能键和数字键。功能键用于选择操作类型；数字键用于参数输入。当键按下时向主 CPU 申请中断。

（4）打印模块　该模块用于控制微型打印机 PP40 打印探伤结果、缺陷回波等。

（5）仪器性能测试模块　根据无损探伤工艺要求，探伤仪应具有性能测试功能，测试项目有电噪声电平、垂直线性误差、动态范围等 12 项。当选择仪器性能测试菜单项时，系统能自动进行性能测试，并给出提示信息及测试结果。

（6）主控模块　该模块是基于超声波探伤工艺设计的，用于控制探伤流程，实现数据的采集、处理、分析，并调用相应的功能模块实现显示、打印。系统探伤由多级中文菜单提示进行，主菜单如图 4-58 所示。

通过数字键选择即可进行相应操作，如选择“现场采样”，则可在现场对工件进行

探伤，以对铁路机车探伤为例，其工作流程如图 4-59 所示。

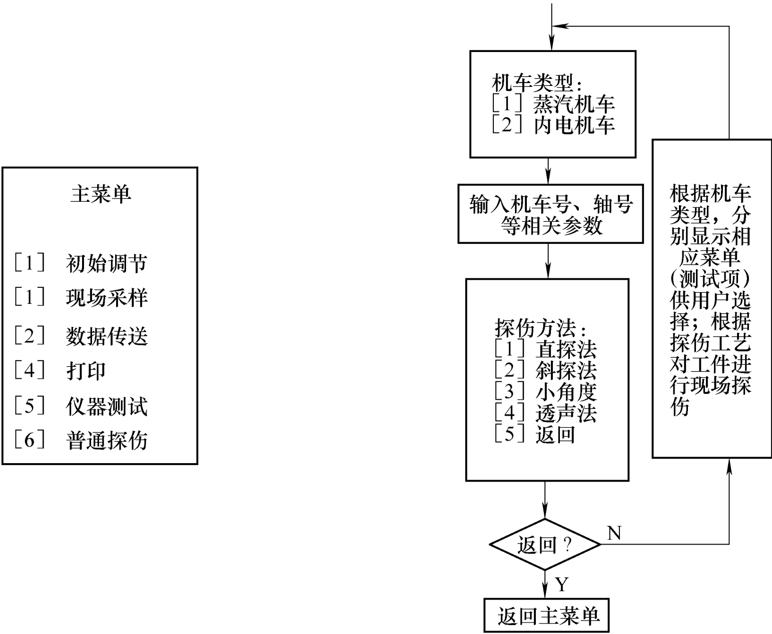



图 4-58　数字化超声波探伤仪的探伤主菜单

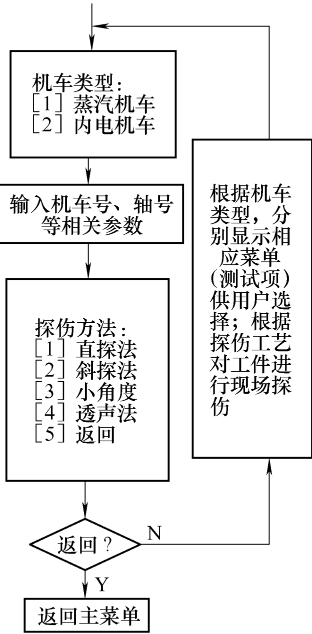



图 4-59　现场探伤流程图

# 4.12　带有集成传感器的轴承单元

带有集成传感器的轴承是把某些功能的传感器与轴承结合为一体而形成的独特结构单元。如带有运动传感器的深沟球轴承，除支承旋转轴外，还可以测量轴承内外圈的相对运动。有时也称这类轴承为智能轴承。传感轴承的类型除深沟球轴承外，还有角接触球轴承、圆锥及圆柱滚子轴承。

## 4.12.1　带有集成传感器的轴承单元的结构特征

带有集成传感器的深沟球轴承除宽度不同外，其他主要尺寸及内部结构与标准深沟球轴承相同。速度传感器单元附加在轴承的非密封端（见图 4-60），传感器座安装在外圈的密封槽内。设计坚固的传感器可承受轴向载荷。传感器座与脉冲发生环之间的迷宫式密封可使轴承免受污染，并防止轴承内的润滑脂外溢。屏蔽的电缆以圆周方向附在传感器座上，不受张力，而且电缆几乎不占空间。

用粉末烧结的铁磁材料制成的脉冲发生环或计数环与旋转的内圈一体，在其圆周上交替分布着极性相反的锯齿状永久磁极，齿的数目也就是轴承每转一周产生的脉冲数取决于轴承的尺寸，如表 4-5 所示。外圈上的传感器座中安装有电子单元，其主要由永久磁铁和霍尔传感器构成。

表 4-5　轴承参数

| 轴承内径/mm | 发生环齿数 |
|---|---|
| 不大于 20 | 48 |
| 25，30，35 | 64 |
| 大于 40 | 80 |

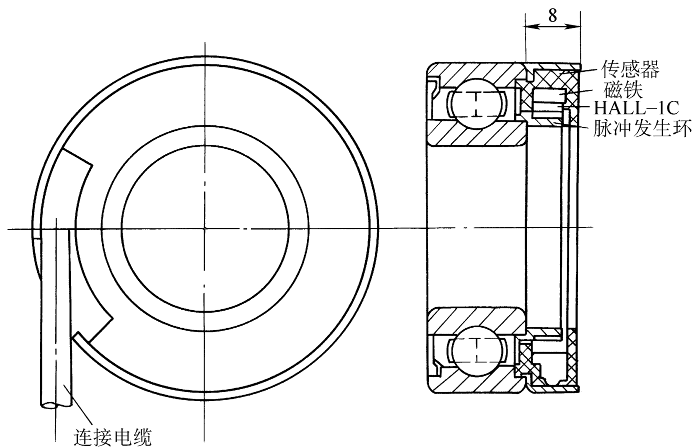



图 4-60　传感器轴承单元结构

## 4.12.2　带有集成传感器的轴承单元的工作原理

位于霍尔传感器上部的永磁体产生磁场，磁力线通过霍尔传感器，再通过脉冲发生圈上的齿及霍尔传感器的外部回到永磁体上。由于脉冲发生环的旋转，每次齿通过传感器的下面时，磁场强度增加；每次齿的间隙处于传感器的下面，永磁体产生磁力线的流动几乎被隔断。每次磁场的变化，霍尔传感器都被触发。霍尔发生器产生的正弦模拟信号由 Schmitt 触发器转变为如图 4-61 所示的方波信号，通过一个带有活性驱动晶体管的输出平台及电缆线传递到用户电子处理单元。输出电路见图 4-62，传感器的操作电压为 5 ~ 24V。轴承的速度为脉冲频率与脉冲发生环上齿数之比，霍尔传感器的最大转换频率为 20kHz，所测得轴承的转速可接近于 0。若只测量速度，仅需一个霍尔传感器。使用两只传感器时，还可测量转动的状态。根据转动的状态，产生一个相位移 90°的信号。除此之外，第二个传感器可以增加每转的脉冲数。

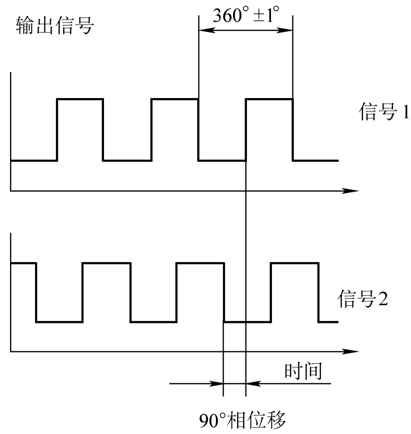



图 4-61　输出信号

### 4.12.3　带有集成传感器的轴承单元的特点

带集成传感器的轴承与外置步进记录器或编码器相比具有如下优点：

1）成本低。传感器轴承价格比外置步进记录器或编码器的低 50%。

2）需求空间小。有传感器的深沟球轴承内外径与标准的深沟球轴承一样，仅宽度增加 8mm；在圆周上有节省空间的电缆输出口，且电缆不受张力。

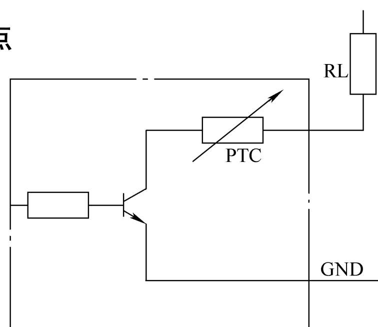


图 4-62　输出电路

3）装配简单。传感器轴承是可以直接安装使用单元，不需调节，并带有防转系统。

4）轴承不需维护。和标准的深沟球轴承一样，一端带有防尘盖或密封，另一端带有间隙密封，终身润滑。

5）可用作有定位的轴承。坚固的传感器外壳允许承受轴向载荷。

6）测量准确度高。脉冲频率高且分辨误差低，角分辨率可达 1.4°。

### 4.12.4　带有集成传感器的轴承单元的应用领域

带集成传感器的轴承除支承转动轴外，还可测量 2 个套圈间的相对运动。传感器用于记录旋转的速度和方向，从这些数据可以获得角速度及转速。

在控制工程方面，为了监控各种设备及自动地运行这些信息的需求也日益增加。带传感器轴承的应用包括轿车、火车、叉车、升降机和电梯、造纸机械、频控的三相异步电动机、机床上的变速电动机、皮带传送机、纺织机械和打包机。其中一个典型的例子是传感器轴承在带有防抱死制动系统（ABS）车辆上的应用，轮毂轴承中的传感器能测车轮的速度变化，车载计算机可根据这些变化做出相应的反应，这种装有传感器轴承的车轮以“智能轮”而著称。

## 4.13　扫描隧道显微镜

1982 年，世界上第一台扫描隧道显微镜（Scanning Tunneling Microscope，STM）诞生，这标志着人类进入了直接观察原子、操纵原子的新时代，标志着在原子和分子水平根据人们的意愿设计、修饰、加工、创造新的物质结构与特性成为可能。使人类能够实时地观测到原子在物质表面的排列状态和与表面电子行为有关的物理化学性质，对表面科学、材料科学、生命科学及微电子技术的研究有着重大意义和重要应用价值。

作为一种新型的表面分析工具的扫描隧道显微镜，STM 实际上就是一个由电子计算机操纵控制的长探针，它的一头变得越来越细，细到尖端就只有几个原子的厚度。利用探针和材料平面间的电流，科学家们可以用 STM 调度材料平面上的原子，而且通过调节电流的大小，可逐个地把原子吸起来并放置到其他地方。

### 4.13.1　扫描隧道显微镜的工作原理

扫描隧道显微镜是根据量子力学中的隧道效应原理，通过探测固体表面原子中电子的隧道电流来分辨固体表面形貌的新型显微装置。根据量子力学原理，由于电子的隧道效应，金属中的电子并不完全局限于金属表面之内，电子云密度并不是在表面边界处突变为零。在金属表面以外，电子云密度呈指数衰减，衰减长度约为 1nm。用一个极细的、只有原子线度的金属针尖作为探针（见图 4-63），将它与样品的表面作为两个电极，当样品表面与针尖非常靠近（距离 $<1$nm）时，两者的电子云略有重叠，如图 4-64 所示。若在两极间加上电压，在电场作用下，电子就会穿过两个电极之间的势垒，通过电子云的狭窄通道流动，从一极流向另一极，形成隧道效应电流。该电流的大小对两电极之间的距离变化极为敏感，两电极间的距离每增加 0.1nm，隧道效应电流就大约减小一个数量级。这样，我们把探针固定在某一高度上，沿样品表面扫描，由于样品表面起伏，电极距离产生变化，就会得到大小不同的隧道效应电流，通过记录该电流的变化，便可反映出样品表面原子的排列情况。

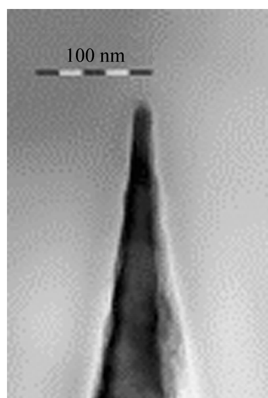



图 4-63　STM 针尖

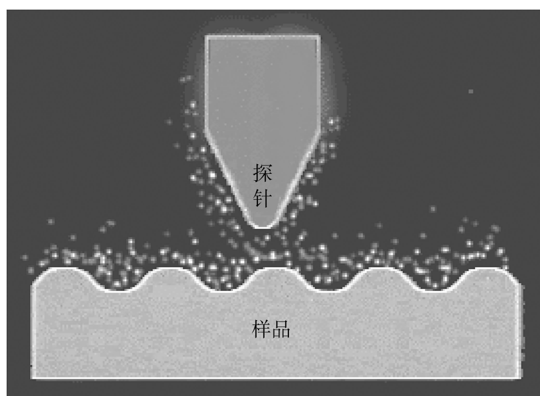



图 4-64　金属表面与针尖的电子云

由于 STM 具有原子级的空间分辨率和广泛的适用性，国际上掀起了研制和应用 STM 的热潮，推动了纳米科技的发展。利用 STM，可以对材料表面进行纳米加工，包括对原子、分子的操纵，对表面进行刻蚀。1990 年 4 月，美国国际商用机器公司的科学家宣布，他们用扫描隧道显微镜操纵氙原子，用 35 个原子排出了“IBM”字样，如图 4-65 所示。

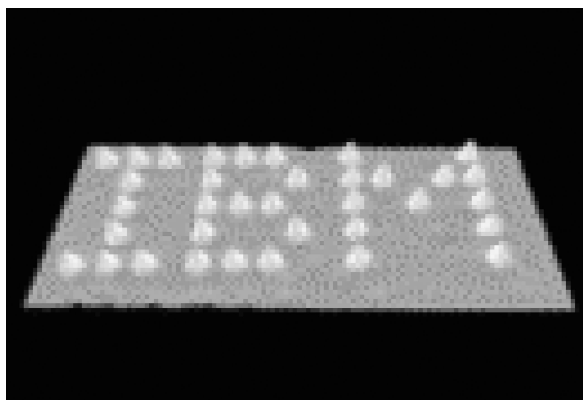


图 4-65　用 35 个氙原子排列的“IBM”字样

## 4.13.2　扫描隧道显微镜的设备组成

通常，扫描隧道显微镜由扫描隧道显微镜主体、控制电路、高分辨图像显示终端和控制计算机（测量软件和数据处理软件）四大部分组成。扫描隧道显微镜主体包括针尖的平面扫描机构、样品与针尖间距控制调节机构及系统与外界振动的隔离装置。

常用的 STM 针尖安放在一个可进行三维运动的压电陶瓷支架上，如图 4-66 所示，$L_x$、$L_y$、$L_z$ 分别控制针尖在 $x$、$y$、$z$ 方向上的运动。在 $L_x$、$L_y$ 上施加电压，便可使针尖沿表面扫描；测量隧道电流 $I$，并以此反馈控制施加在 $L_z$ 上的电压 $V_z$；再利用计算机的测量软件和数据处理软件将得到的信息在屏幕上显示出来。

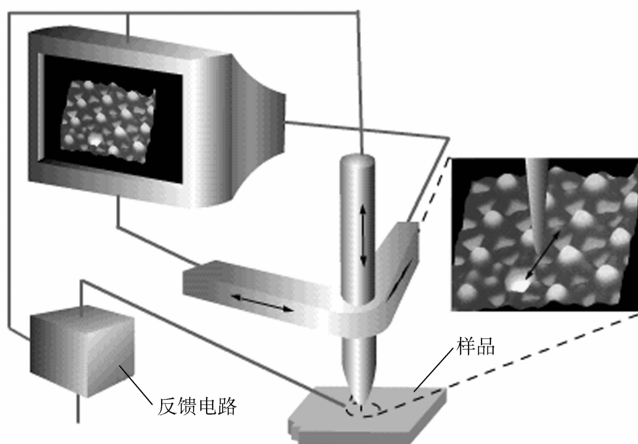



图 4-66　STM 工作原理图

扫描隧道显微镜的图像表达方式基本上可分为两种。一种为灰度像，即把样品表面高低的变化表达为颜色的深浅，最为常见。如晶体硅的表面结构的 STM 像和固定在晶体铑表面的苯分子的 STM 像，图中的白色斑点代表表面凸起的一个个小包，是硅或碳原子在表面的排列状态。黑色斑点则代表表面一个个凹谷。灰度像中苯分子六元环结构清晰可辨。另外一种图像表达方式为线扫描像，即把样品表面高低的变化参数 $Z$ 加上图像纵坐标 $Y$ 的变化对图像的横坐标 $X$ 作图而来。

## 4.13.3　扫描隧道显微镜的工作方式

STM 有恒电流模式和恒高度工作模式两种工作方式，恒电流工作模式如图 4-67 所示，此时电流 $I$ 不变，针尖随着样品表面的高低（$z$）起伏作相同的起伏运动。利用一套电子反馈线路控制隧道电流 $I$，使其保持恒定。再通过计算机系统控制针尖在样品表面扫描，即使针尖沿 $x$、$y$ 两个方向作二维运动。由于要控制隧道电流 $I$ 不变，针尖与样品表面之间的局域高度也会保持不变，因而针尖就会随着样品表面的高低起

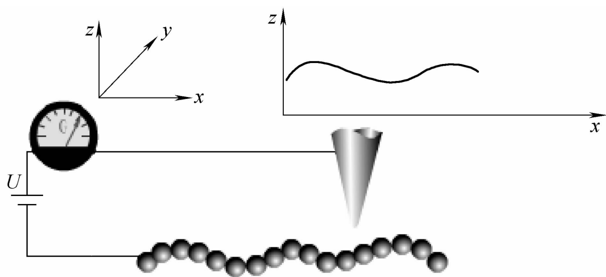



图 4-67　恒电流工作模式

伏而作相同的起伏运动，高度的信息也就由此反映出来。这就是说，STM 得到了样品表面的三维立体信息。这种工作方式获取图像信息全面，显微图像质量高，应用广泛。

恒高度工作模式如图 4-68 所示，高度 $z$ 不变，电流发生变化。在对样品进行扫描过程中保持针尖的绝对高度不变，于是针尖与样品表面的局域距离将发生变化，隧道电流的大小也随着发生变化；通过计算机记录隧道电流的变化，并转换成图像信号显示出来，即得到了 STM 显微图像。这种工作方式仅适用于样品表面较平坦、组成成分单一（如由同一种原子组成）的情形。从 STM 的工作原理可以看到：STM 工作的特点是利用针尖扫描样品表面，通过隧道电流获取显微图像，而不需要光源和透镜。这正是“扫描隧道显微镜”得名的原因。

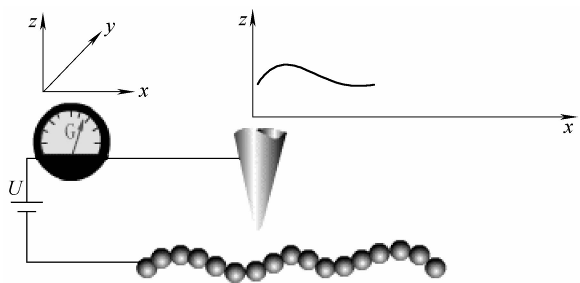



图 4-68　恒高度工作模式

## 4.13.4　扫描隧道显微镜的应用

扫描隧道显微镜具有横向为 0.1nm，纵向为 0.01nm 的超高分辨率，且对样品制备无特殊要求，实验中对样品无损伤，因此它比已有的显微技术，如高倍光学显微镜、扫描电子显微镜、扫描透射电子显微镜及场发射离子显微镜等具有更多的优越性。而且 STM 给出的是实空间下的、与样品表面形貌直接相关的几何图像，因此它比 X 射线衍射、低能电子衍射等衍射技术在结果解释方面要简单得多。更重要的是，STM 作为一种显微技术可用于溶液环境下的现场表面结构分析，用它可观察到脱氧核糖核酸（DNA）的螺旋结构，并且为活体显微研究打开了大门，如图 4-69 所示。

STM 已成为表面科学、纳米电子学、分子电子学和超高密度存储器件研究不可或缺的工具，从而在纳米科技中占有举足轻重的地位。STM 的应用包括物理学、化学、生物学、材料科学和电子学等众多领域。如：

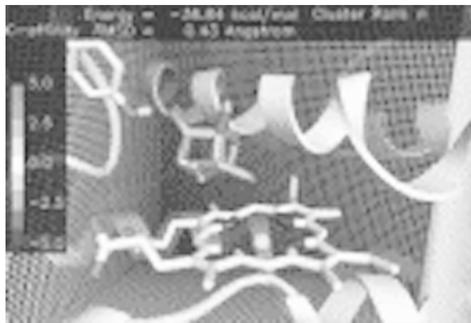


图 4-69　对 DNA 的微观研究

1）利用 STM 并结合其他分析技术，可以确定许多材料的表面结构，因此成为表面科学中确定表面原子结构的强有力工具。

2）由于有能力使局域结构以原子的细节成像，STM 成为研究成核现象、薄膜生长和晶体生长的理想工具。

3）STM 能够在原子水平上研究固体表面发生的化学反应，故在表面化学中具有广泛的应用。

4）利用 STM 能够分辨出许多有机分子和生物大分子的原子结构，因而可广泛运用于有机化学和生物材料的研究。

5）由于 STM 能在液-固界面工作，因此可以在原子水平上研究电镀、化学镀、电池、腐蚀和防腐等许多方面的电化学过程。

6）STM 成为在原子和分子水平上操纵、修饰、加工、设计和创造新的结构和物质的工具。

## 4.14　微致动器

微致动器又称微驱动器或微执行器，是能够产生和执行动作的一类微机械部件或器件的总称。微致动器是微机械的重要组成部分，具有非常广泛的应用领域，如航天技术、海洋工程、原子能、医药、汽车、生物工程等领域。

### 4.14.1　微致动器的工作原理

微致动功能的实现可以基于各种不同的物理原理。例如，利用两极间的静电力可以实现微米距离的爬行；利用两电动机之间的逆压电效应引起机械变形可以得到压电式电动机或超声电动机等新型微电动机；利用磁致伸缩、超导、特种合金的形状记忆等功能也可以制成许多新型的微致动器。

### 4.14.2　微致动器的种类

从装置类型来看，微致动器可分为微转动电动机、微直线运动电动机、微夹持器、微泵、微阀门、微闸门、微涡轮机，以及微机构，如微齿轮、微转轴等；从物理性质来看微致动器可以分为静电、压电、电磁、磁致伸缩、热、光电、气动、生物、超导和记忆合金等。此外，可以利用各种智能材料与智能结构来制作微致动器。利用无间隙的微驱动机构及其控制技术已开发出了多种压电陶瓷驱动的微致动器，可以实现直线和旋转运动，其驱动精度可达到微米级以上。

### 4.14.3　微致动器的工程应用

#### 1. 微电动机

微致动器的最常用方式是微电动机。微电动机分为静电电动机、超声电动机、电磁电动机、谐振电动机和生物电动机，其中静电电动机应用最多。静电电动机利用两充电电极之间静电能量的变化趋势产生机械位移，这种作用力使电极趋于互相接近，并达到一能量最小的稳定位置。通过固定一个电极，并限制另一个电极向其移动的自由度，可以获得一个单一方向的位移。所要施加的力可以通过对沿梯度方向静电能求导数来计算。

在图 4-70 所示的直线电动机中，该系统由一个运动件（即图中运动电极）和一个固定件（即图中静止电极）组成，它们上面都沉积有电极。通过对静子施加一系列电压可以使运动件产生一步步的直线运动，运动速度的控制可以通过调节电极上施加的

电压来达到。

如果将电极均匀地固定在圆周上形成转子，而把静子固定在外环上就可以形成如图 4-71 所示的转动式直线电动机。目前，已经在硅材料上制作出了多种类型的直径为 30 ~ 100μm 的转动电动机，转速最快可达 4000r/min。

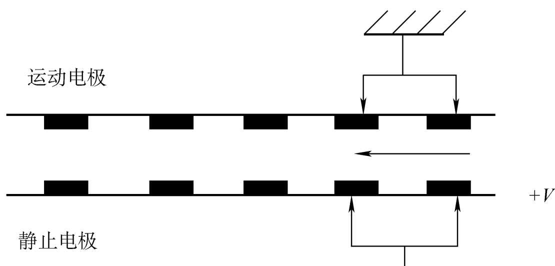



图 4-70　直线电动机

图 4-72 所示为可变电容式侧向驱动微电动机。它的定子和转子需要导电材料及绝缘材料，这方面与多晶硅表面微技术机械加工技术是兼容的。转子和定子都采用深层光刻技术制备，两者的间隙应足够小，才能产生足够大的转矩。但随着这个间隙尺寸由宏观尺寸向微米级的微观尺寸的过渡，空气中的电击穿现象将变得更为严重。对宏观尺寸来说，空气中的电场击穿极限约为 $3 \times 10^6$V/m；而对微米级尺寸来说，电场击穿极限增加到 $10^8$V/m；对小于微米级的间隙尺寸来说，已接近空气分子的平均自由程，其结果可能引起雪崩式的电场击穿。对于静电型电动机来说，通常采用氯化硅作绝缘层。

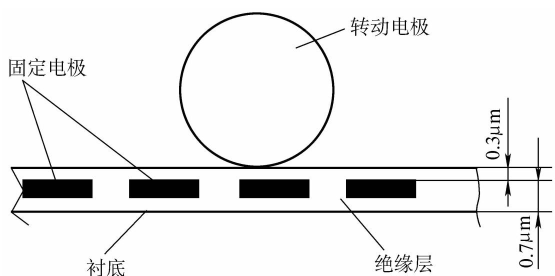



图 4-71　滚动式直线电动机

图 4-72 描述了静电型微电动机的工作原理。在某一激发相位结束的瞬间，转子与被激发的定子的相位完全对准，图中转子极 1 与定子极 B 的相位完全对准。为使转子顺时针方向转动，接下来的一步是要激发定子极 C 相位。如要使转子逆时针方向转动，则下一步需要激发定子板 A 相位。对激发信号进行适当的变换控制就可使转子连续旋转。这类电动机的基本原理是利用在可变的转子—定子电容中的电能存储，沿运动方向上的电容变化与微电动机的输出转矩成正比，因此在设计中应增加沿运动方向的电容变化以获得最大的输出转矩。利用平行平板电容近似方法可以非常粗略地估算微电动机的转矩，若利用有限元分析方法则可以较为精确地计算其输出转矩。

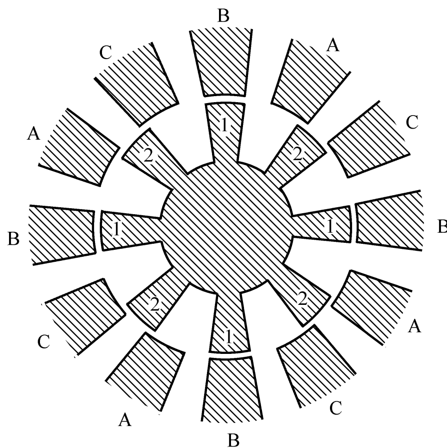



图 4-72　静电型微电动机原理平面图

表 4-6 列出了多晶硅静电微电动机的典型尺寸。这类多晶硅静电微电动机已经在绝

缘液体，如去离子水或硅油及气体环境中进行了运转试验，随着研究工作的进一步深入，其性能和寿命都已得到提高。对某些微电动机来说，只需 30V 驱动电压。在空气环境中，开环的步进工作速度已可高达 15000r/min，这时对速度的限制只是来自电源方面的而并非微电动机本身。在室内空气环境中或在硅油中，微电动机的寿命可达几天。许多电动机均已经过几百万次起停试验，但出现的故障却各不相同。动态摩擦转矩低于微电动机运转矩的 10%，在微电动机的运转中，磨损并不是主要的限制因素。图 4-73 是图 4-72 所示的凸极式和摆动式微电动机的截面结构。

**表 4-6　微电动机的典型尺寸**　（单位：mm）

| 参　数 | 值 |
|---|---|
| 转子—定子间隙 | 1.5 ~ 2.5 |
| 转子内径 | 10 ~ 20 |
| 转子外径 | 50 ~ 75 |
| 轴承间隙 | 0.3 ~ 0.8 |
| 转子到基板间隙 | 2 ~ 2.5 |

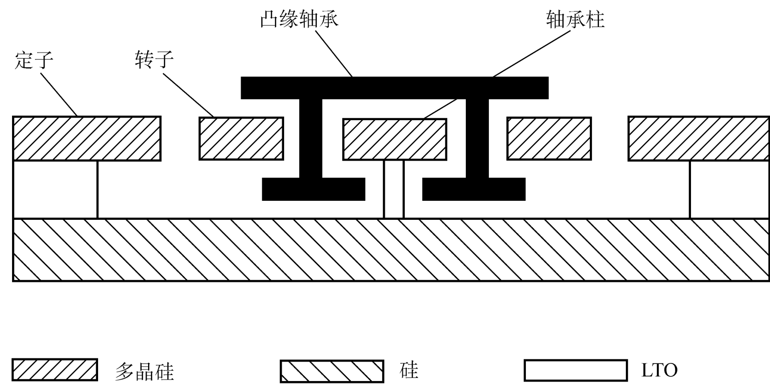



图 4-73　凸极式和摆动式微电动机的截面结构

表 4-7 所示为常见的几种微电动机的性能比较。

**表 4-7　微电动机的性能比较**

| 类　型 | 尺　寸 | 速　度 | 力　矩 |
|---|---|---|---|
| 转动式静电电动机 | 30 ~ 100μm（转子直径） | 500r/min | |
| Wobble 电动机 | 100 ~ 600μm（转子直径） | 4000r/min | $2\times10^{-5}$N · m（300r/min 时） |
| 直线式静电电动机 | 0.8 ~ 3mm | $1.96\times10^{-4}$cm/min | |
| 渐进波压电转动电动机 | 5 ~ 100mm（转子直径） | 50 ~ 500r/min | 2N · m |
| 多模式压电电动机 | 50mm | 150 ~ 300r/min | 0.18N · m（129r/min 时） |
| 混合式转动电动机 | 直径 20mm<br>长 77mm | 100 ~ 450r/min | 29.4N · cm<br>（200r/min 时） |
| 磁致伸缩直线电动机 | 长 6mm，宽 4mm | 0.5mm/s | |

**2. 磁致伸缩致动器**

将磁致伸缩合金等材料放在磁场中时，它会产生微小的应变，这就是磁致伸缩现象。

这些材料可适用于微机器人。现有一种“Wiedmann”效应的电动机使磁致伸缩弹簧产生机体的运动。另一种是由磁致伸缩合金作爪子的微机器人，其运动速度可达 0.5mm/s。

**3. 悬浮式致动器**

摩擦相对于微致动器这类体积很小而表面粗糙度对其影响较大的对象来讲是一种不希望见到的现象。解决问题的方法之一就是靠静电或磁力产生悬浮。

磁悬浮与超导体联合使用可产生特定效果。将运动件平行地放在磁膜上，而固定件平行地放在超导薄膜上。当将材料冷却至极限温度时，在两部件间产生垂直方向的悬浮力；当两个结构间的周期有差别时，可产生水平位移。这种方式的悬浮高度可达几微米。

**4. 形状记忆合金致动器**

形状记忆合金具有在马氏体相变时产生变形恢复的性质。利用此原理可以制作微致动器。靠螺旋弹簧结构可以获得机构的变形和力，响应周期为 0.1s。

## 4.15 微机器人

微机器人是相对比较完备的微型机械电子系统（MEMS）的代表。它的应用主要集中在工业领域、医学领域及基础学科研究领域，在移动或处理微组织、区分细胞、DNA 分析等各项研究方面，微机器人都发挥着重要作用。在生物医疗方面，微机器人可辅助进行细胞区分等辅助诊断，以及眼部、脑部微细手术。

微机器人的整体尺寸为毫米级或更小，零部件尺寸为毫米级或微米级，采用微细加工技术或精密加工技术制成。它是能完成模拟人的某种特定动作（如观察、移动、拿取等操作）的微电子机械系统。系统中包括或部分包括微传感器、微致动器、微操作器、微能源及控制单元等。

微机器人研究始于 20 世纪 80 年代末微机械出现时期。1987 年美国出现的直径为 100μm 的静电微电动机为微机器人的研究提供了基础。随后麻省理工学院人工智能实验室研制出取名分别为 Squirt 和 Gnot 的微机器人，并制出用于情报收集和窃听的“蚊子机器人”；日本的横滨国立大学与东芝公司合作，也开展了基于气动柔性微驱动器 FMA 的微机器人的研究；日本早稻田大学的形状记忆合金微机器人、东京大学的爬坡微机器人、名古屋大学的管道移动微机器人等都具有一定的代表性。随着智能材料与智能结构研究日益深入，将智能材料学用于微机器人以实现其结构的微型化、智能化及功能的集成化，已成为微机器人研究的一个主要发展趋势。美国麻省理工学院已将压电材料应用于微机器人的微驱动器；加拿大 MacGill 大学生物机器人实验室开展了形状记忆合金微执行器用于微机器人的研究；日本冈山大学还开展了电流变微驱动器的研究工作。

微机器人研究无疑会涉及精确定位、精密与微小光电器件、微传感器、微机构等广泛的学科和技术。随着智能材料、智能结构、MEMS 及微/纳米加工技术的日臻完善，微机器人技术得到迅速发展，并在航空、航天、核工业及计算机领域得到成功的应用。

## 4.15.1　微机器人系统

### 1. 单一微机器人系统

微机器人系统通常是将微传感器、微致动器、微操作器、微能源及控制单元等根据微机器人特定的功能巧妙地组合在一个微小的机体内。由于体积很小，不可能装载更多的元件，因此这一系统通常用于完成某种特定的单一任务。美国约翰逊宇航中心研制的一种由太阳能驱动的机器蝴蝶，其内部装有简单的控制系统，具有飞行功能，能被发射升空进入地球轨道以完成某些空间探测任务，并将信息传递给接收站。图 4-74 和图 4-75 所示为美国密歇根大学开发的伸缩移动式微机器人和爬墙微机器人。



图 4-74　伸缩移动式微机器人



图 4-75　爬墙微机器人

图 4-76 所示为韩国微机器人公司的微机器人产品 Hexavoider，它是一种可编程的活动微机器人，可独立地移动并且具有躲避障碍物左右移动的功能。Hexavoider 使用红外线的发射器和接收装置感应它周围的环境。它还有 2 条触角式天线，这些天线也具有感应障碍物的功能。Hexavoider 使用 C 语言编程，用户可在自己的计算机中编程，并用闪速存储器把程序下载到机器人中，也可选择 RF（无线电频率）模块，通过使用该模块，用户能直接用计算机中控制 Hexavoider 运动，当中间的一对腿控制机器人的运动时，前后腿起到移动的作用。Hexavoider 由 3 台直流伺服电动机驱动。

图 4-77 为一采用表面显微机械加工技术由硅模板制作的 6 足微机器人，外形尺寸

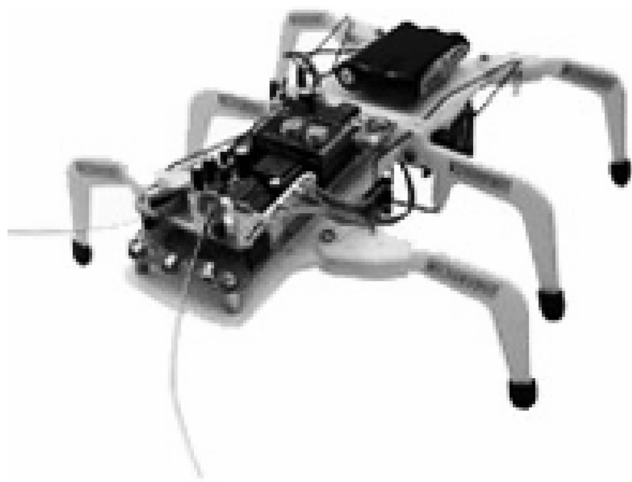


图 4-76　微机器人 Hexavoider

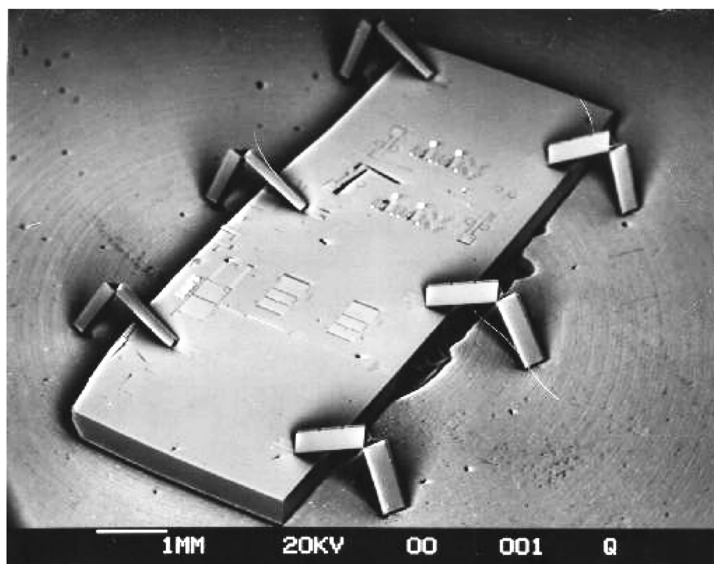



图 4-77　硅模板 6 足微机器人

为 1cm×2cm。该微机器人的行进速度为 1mm/s，耗电为微瓦级。

**2. 多微机器人系统**

单个微机器人一般只能担任单项或部分任务。当作业比较复杂时，就要求多台微机器人构成多级系统或机器人群，以便各司其职，相互补充，协调工作。

## 4.15.2　典型微机器人

**1. 黏滑压电致动微机器人**

瑞士苏黎世技术学院的研究小组于 1994 年实验的 3 自由度机器人是一种可以夹持

微米尺寸的物体，并以纳米级的精度定位的纳米机器人。纳米机器人分为图像识别系统、计算机控制位移系统，以及为实现特定功能而设计的微工具（microtools）系统几个部分，如图 4-78 所示。

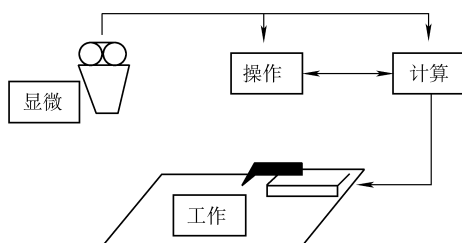


图 4-78　纳米机器人

其中，图像识别系统的作用是将图像反馈给计算机控制位移系统，操纵 3DOF 工作台定位。工作台所用的高精度定位系统的核心部件是微压电致动器。

这种微压电致动器已成功地应用于扫描隧道显微镜（STM）和原子力显微镜（AFM）。纳米机器人的微工具，如微镊子是集传感器、致动器于一体的微机械，用于夹持微物体。

目前，纳米机器人的致动一般是通过蠕动机构、冲击驱动、惯性驱动、黏滑机构和基于杠杆的驱动等几种方式实现。黏滑压电致动微机器人采用的是惯性驱动。

黏滑压电致动微机器人由内外两个平台构成，平台之间用三个压电致动器和柔性铰链相连。黏滑压电致动微机器人在工作台上的移动精度可达 10nm。需要快速移动时，压电致动器在 150V 电压下可一步移动 2.5mm。黏滑压电致动微机器人定位的准确度依赖于图像识别系统的反馈控制环，该反馈控制环是基于对由扫描电子显微镜 SEM 摄取的静态图像的分析和处理。

黏滑压电致动微机器人采用惯性驱动的原理如图 4-79 所示。通过压电材料的电致伸缩效应使质量中心前移，并在压电材料收缩时利用微致动器的惯性使微致动器向前运动。

**2. 细线跟踪自行走微机器人**

细线跟踪自行走微机器人是一种微型自主机器人，它由致动器、传感器和控制器构成，设计为可沿一条黑线运动（运动路线标识）。细线跟踪自行走微机器人的结构如图 4-80a 所示。细线跟踪自行走微机器人采用的是电磁铁致动器，共有左右两组。电磁铁致动器单元的结构如图 4-80b 所示。

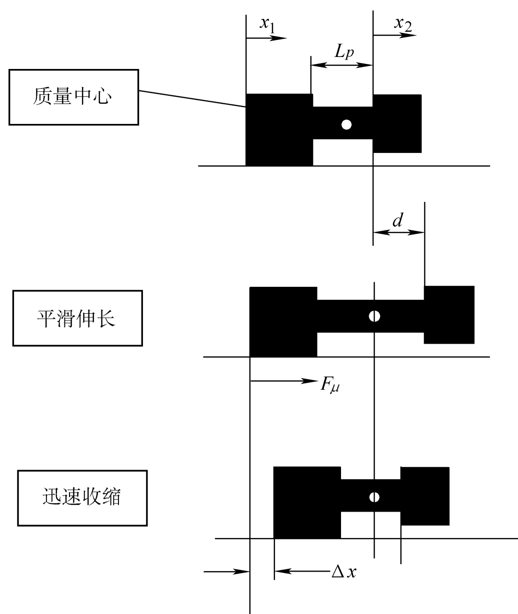


图 4-79　惯性驱动原理

线圈绕组在加载电流时可将悬置在绕组中的弹簧片向前移动，同时弹簧片又连接带倾斜纤毛的底板，这样通过线圈绕组就可移动带倾斜纤毛的底板。带倾斜纤毛的底板的作用在于用倾斜成一定角度的纤毛来保证单向移动。两个电磁铁致

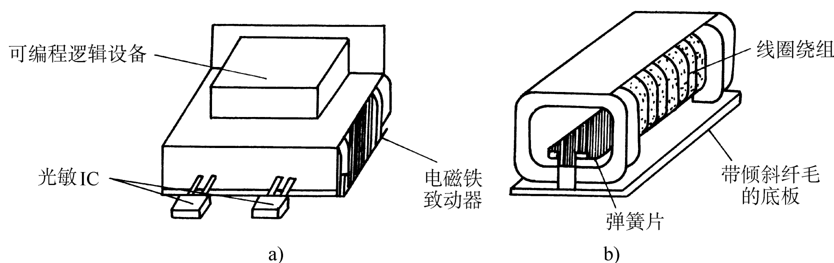



图 4-80　细线跟踪自行走微机器人

动器单元交替通电就可使微机器人运动。细线跟踪自行走微机器人通过悬伸在前端的光敏 IC（红外线传感器）拾取地上黑线，红外线传感器可判别微机器人是否沿黑线移动，并将结果传输给控制器（置于微机器人顶端的可编程逻辑设备）处理。由控制器决定两个电磁铁致动器单元的运动与否，以保证微机器人始终沿黑线运动。

**3. 核反应堆管道检查微机器人**

核反应堆的冷却采用三层循环水方式以保证充分冷却和防止核污染的泄漏。三层循环水的流通管道是相互隔离的。为进行核反应堆的管道检查，要求微机器人应具有对环境的感知能力、自驱动能力、可遥控性及信号接收与传输等性能。核反应堆管道检查微机器人可以在检查热交换管时不停工或使停工时间尽量少。值得一提的是该系统的任何一部分的研制对于大规模生产适于工业应用的 MEMS 部件都大有指导意义。管道检查机器人由前端的超声波微声纳和微视觉传感器来识别前进方向，并由压电驱动器和蠕动驱动机构提供向前的蠕动力。由微光谱摄像仪连接器完成对管壁的检查。检查结果信号由光电转换器拾取。远程操纵协调控制器及微波发射器是远程控制信号的传入和输出设备。

**4. 微型飞行器**

微型飞行器（Micro Air Vehicle，MAV）也称为微型飞机，它与传统意义上的飞机有本质区别，当前其长、宽、高的目标尺寸极限不超过 15cm，预计在不远的将来微型飞行器将被制作成昆虫一样大小。微型飞行器主要采用了微型电子机械制造技术，系统功能高度集成，其成本及价格大为降低。微型飞行器便于随身携带，可配备给单兵或单人使用，适应军事或民用的隐蔽性侦察、城市或室内等复杂环境作战、跟踪尾随、化学或辐射等有害环境探测、复杂环境的救生定位等特殊任务。微型飞行器属于一种可军民两用的新型装备。

微型飞行器的基本特征是尺寸小，目前最小尺寸的无人驾驶机的翼展为 1.2m，质量仅为 4.5kg。而 MAV 的尺寸约为它的 1/10，重量约 50g。15cm 尺寸的限制，一方面是从它的特殊用途考虑的，即尺寸越小越容易满足便于携带、成本低廉、维护方便、隐蔽性高等特定要求。另一方面与一般的战斗机或小型无人飞机相比较，飞行器的尺寸小到 15cm 以下时，其飞行特性将界于最小的飞鸟与最大的昆虫之间；其物理特性会发生根本性改变：雷诺数极小，表面积与体积之比很大，总重量（包括负载）严格受限。从结构特点、飞行力学、负载特性、能量供给、敏捷性等方面来看，微型飞行器

与蜜蜂、蜻蜓很相似，有时蜂鸟更相似，已经与任何传统的飞机有了本质区别。微型飞行器的研究涉及器件集成、通信、飞控、负载、能量与推进技术等课题。

## 4.16　光栅测量系统

光栅是一种最常见的测量装置，属于非接触式直接测量。光栅按形状分为圆光栅和长光栅。圆光栅用于角位移的检测，长光栅用于直线位移的检测。光栅的响应速度快，检测精度较高，可达 1μm 以上。

### 4.16.1　光栅结构

光栅是利用光的透射、衍射现象制成的光电检测元件，主要由光栅尺（包括标尺光栅和指示光栅）和光栅读数头两部分组成。通常，标尺光栅固定在机床的运动部件（如工作台或丝杠）上，光栅读数头安装在机床的固定部件（如机床底座）上，两者随着工作台的移动而相对移动。在光栅读数头中，安装着一个指示光栅，当光栅读数头相对于标尺光栅移动时，指示光栅便在标尺光栅上移动。当安装光栅时，要严格保证标尺光栅和指示光栅的平行度及两者之间的间隙（一般取 0.05mm 或 0.1mm）要求。

光栅尺是用真空镀膜的方法光刻上均匀密集线纹的透明玻璃片或长条形金属镜面。对于长广栅，这些线纹相互平行，各线纹之间的距离相等，称此距离为光栅距。对于圆光栅，这些线纹是等栅距角的向心条纹。栅距和栅角是决定光栅光学性质的基本参数。常见的长光栅的线纹密度为 25 条/mm、50 条/mm、100 条/mm、250 条/mm。对于圆光栅，若直径为 70mm，则一周内刻线 100 ~ 768 条；若直径为 110mm，则一周内刻线达 600 ~ 1024 条，甚至更高。同一个光栅元件，其标尺光栅和指示光栅的线纹密度必须相同。

图 4-81 是光栅读数头的构成图，它由光源、透镜、指示光栅、光敏元件和驱动电路组成。读数头的光源一般采用白炽灯泡。白炽灯泡发出的辐射光线经过透镜后变成平行光束，照射在光栅上。光敏元件是一种将光强信号转换为电信号的光电转换元件，它接收透过光栅尺的光强信号，并将其转换成与之成比例的电压信号。由于光敏元件产生的电压信号一般比较微弱，在长距离传送时很容易被各种干扰信号所淹没、覆盖，造成传送失真。为了保证光敏元件输出的信号在传送中不失真，应首先将该电压信号进行功率和电压放大，然后再进行传送。驱动电路就是实现对光敏元件输出信号进行

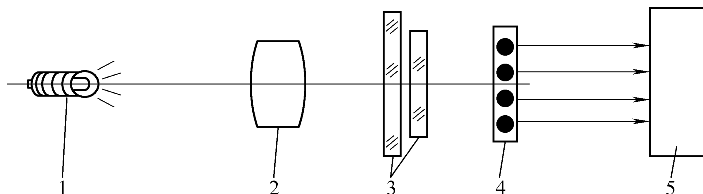



图 4-81　光栅读数头

1—光源　2—透镜　3—指示光栅　4—光敏元件　5—驱动电路

功率和电压放大的电路。

## 4.16.2　光栅工作原理

常见光栅的工作原理都是根据物理上莫尔条纹的形成原理进行工作的。图 4-82 为其工作原理图。当使指示光栅上的线纹与标尺光栅上的线纹成一角度 $\theta$ 来放置两光栅尺时，必然会造成两光栅尺上的线纹互相交叉。在光源的照射下，交叉点近旁的小区域内由于黑色线纹重叠，因而遮光面积最小，挡光效应最弱，光的累积作用使得这个区域出现亮带。相反，距交叉点较远的区域，因两光栅尺不透明的黑色线纹的重叠部分变得越来越少，不透明区域面积逐渐变大，即遮光面积逐渐变大，使得挡光效应变强，只有较少的光线能通过这个区域透过光栅，使这个区域出现暗带。这些与光栅线纹几乎垂直，相间出现的亮、暗带就是莫尔条纹。

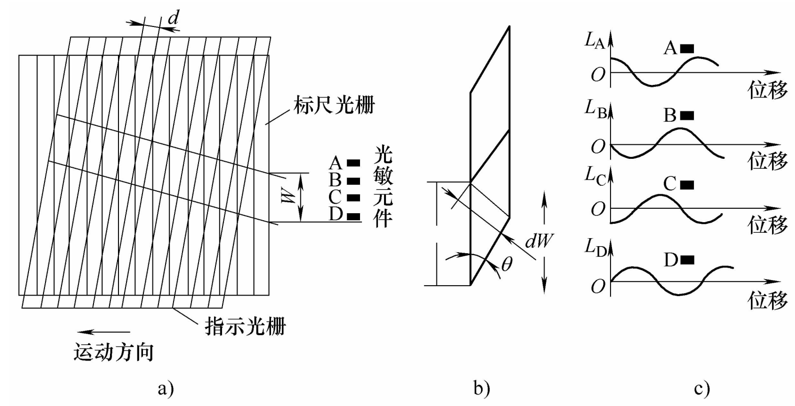



图 4-82　光栅工作原理

莫尔条纹具有以下性质：

1）当用平行光束照射光栅时，透过莫尔条纹的光强度分布近似于余弦函数。

2）若用 $W$ 表示莫尔条纹的宽度，$d$ 表示光栅的栅距，$\theta$ 表示两光栅尺线纹的夹角，则它们之间的几何关系为

$$W = d/\sin\theta$$

当角很小时，$\sin\theta \approx \theta$，上式可近似写成

$$W = d/\theta$$

若取 $d = 0.01\text{mm}$，$\theta = 0.01\text{rad}$，则由上式可得 $W = 1\text{mm}$。这说明，无需复杂的光学系统和电子系统，利用光的干涉现象，就能把光栅的栅距转换成放大 100 倍的莫尔条纹的宽度。这种放大作用是光栅的一个重要特点。

3）由于莫尔条纹是由若干条光栅线纹共同干涉形成的，所以莫尔条纹对光栅个别线纹之间的栅距误差具有平均效应，能消除光栅栅距不均匀所造成的影响。

4）莫尔条纹的移动与两光栅尺之间的相对移动相对应。两光栅尺相对移动一个栅距 $d$，莫尔条纹便相应移动一个莫尔条纹宽度 $W$，其方向与两光栅尺相对移动的方向垂直，且当两光栅尺相对移动的方向改变时，莫尔条纹移动的方向也随之改变。

根据上述莫尔条纹的特性，假如我们在莫尔条纹移动的方向上开 4 个观察窗口 A、B、C、D，且使这 4 个窗口两两相距 1/4 莫尔条纹宽度，即 $W/4$。由上述讨论可知，当两光栅尺相对移动时，莫尔条纹随之移动，从 4 个观察窗口 A、B、C、D 可以得到 4 个在相位上依次超前或滞后（取决于两光栅尺相对移动的方向）1/4 周期（即 $\pi/2$）的近似于余弦函数的光强度变化过程，用 $L_A$，$L_B$，$L_C$，$L_D$ 表示，如图 4-84c 所示。若采用光敏元件来检测，光敏元件把透过观察窗口的光强度变化转换成相应的电压信号，设为 $L_A$、$L_B$、$L_C$ 和 $L_D$。根据这 4 个电压信号，即可以检测出光栅尺的相对移动。

光栅测量系统的基本构成如图 4-83 所示。光栅移动时产生的莫尔条纹由光敏元件接受，然后经过位移数字变换电路形成顺时针方向的正向脉冲或者反时钟方向的反向脉冲，输入可逆计数器。

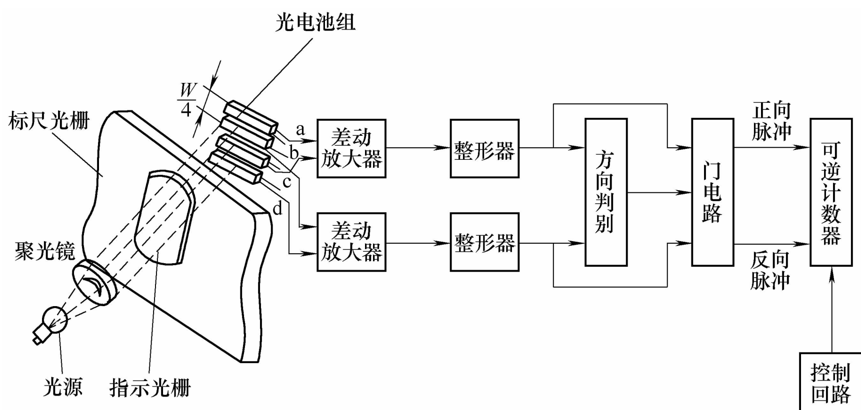



图 4-83　光栅测量系统

## 4.16.3　光栅种类

在玻璃的表面上制成透明与不透明间隔相等的线纹，称透射光栅；在金属的镜面上制成全反射与漫反射间隔相等的线纹，称反射光栅，也可以把线纹做成具有一定衍射角度的定向光栅。

计量光栅分为长光栅（测量直线位移）和圆光栅（测量角位移），而每一种又根据其用途和材质的不同分为多种。

（1）直线光栅

1）玻璃透射光栅。它是在玻璃表面感光材料的涂层上或者在金属镀膜上制成的光栅线纹，也有用刻蜡、腐蚀、涂黑工艺制成的。光栅的几何尺寸主要根据光栅线纹的长度和安装情况具体确定，如图 4-84 所示。

玻璃透射光栅的特点是：光源可以采用垂直入射，光敏元件可直接接受光信号，因此信号幅度大，读数头结构简单；每毫米上的线纹数多，一般常用的黑白光栅可做到每毫米 100 条线，再经过电路细分，可做到微米级的分辨率。

2）金属反射光栅。是在钢尺或不锈钢带的镜面上用照相腐蚀工艺制作或用钻石刀直接刻画制作光栅条纹。

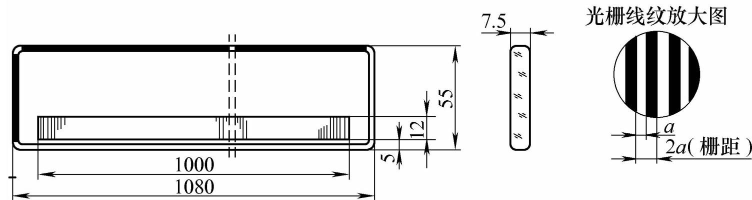



图 4-84　透射光栅

金属反射光栅的特点是：标尺光栅的线膨胀系数很容易做到与机床材料一致；标尺光栅的安装和调整比较方便；安装面积较小；易于接长或制成整根的钢带长光栅；不易碰碎。目前常用的每毫米线纹数为 4、10、25、40、50。

（2）圆光栅　圆光栅是在玻璃圆盘的外环端面上，做成黑白间隔条纹，根据不同的使用要求在圆周上的线纹数也不相同。圆光栅一般有 3 种形式。

1）六十进制，如 10800、21600、32400、64800 等。

2）十进制，如 1000、2500、5000 等。

3）二进制，如 512、1024、2048 等。

圆光栅的结构如图 4-85 所示。

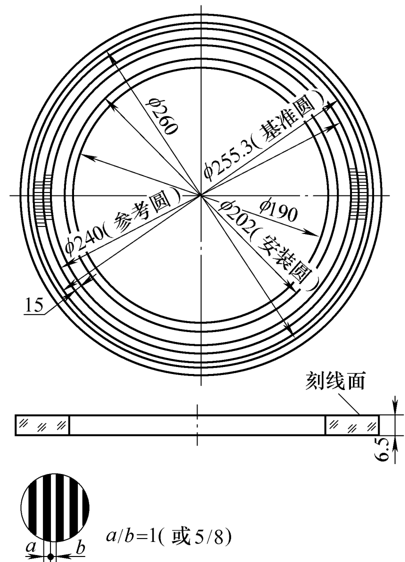



图 4-85　圆光栅

## 4.16.4　光栅精度

光栅检测系统的精度主要取决于光栅尺本体的制造精度，也就是计量光栅任意两点间的误差，即累积误差。由于使用了莫尔条纹技术，因此，相邻误差得以适当的被修正，但对累积误差无多大改善。

由于激光技术的发展，光栅制作精度可以提高，目前光栅精度可以达到微米级，再通过细分电路可以做到 0.1μm，甚至更高的分辨率。几种常用光栅的精度数据见表 4-8。

**表 4-8　各种光栅的精度**

| 计量光栅 | | 光栅长度 | 线纹数 | 精　度 |
|---|---|---|---|---|
| 直线式 | 玻璃透射光栅 | 500 | 100/mm | 5μm |
| | 玻璃透射光栅 | 1000 | 100/mm | 10μm |
| | 金属反射光栅 | 500 | 25/mm | 7μm |
| | 金属反射光栅 | 1220 | 40/mm | 13μm |
| | 高精度反射光栅 | 1000 | 50/mm | 7.5μm |
| | 玻璃衍射光栅 | 300 | 250/mm | 1.5μm |
| 回转式 | 玻璃圆光栅 | ϕ270 | 10800/周 | 3″ |

### 4.16.5　光栅测量系统的工程应用

1）各类测量机构、仪器的位移测量。弹簧试验机、三坐标机、投影仪。

2）各类机床的数显系统。车床、铣床、磨床、镗床、电火花、钻床等。

3）各类数控机床的配套使用。数控铣、加工中心、数控磨等。

4）配接 PLC。用于各类自动化机构的位移测量。

## 4.17　激光陀螺仪

激光陀螺仪可以精确地测定旋转角速度。目前已应用于航空、汽车的导航系统，图 4-86 为激光陀螺仪的原理图。

激光陀螺仪呈圆形，两束激光在圆中逆向传播。激光的工作波长按照光圆周传播的总距离为波长的整数倍关系自动调整。这里，如果使整个装置以角速度绕圆的中心轴旋转，当旋转同方向的激光束绕圆周一周时，其传播的光程距离比静止时的稍长，而旋转反方向的激光束的光程距离比静止时的稍短。于是，两列波因为干涉产生差拍（频率差的节拍）。通过测定该差频可知旋转角速度。

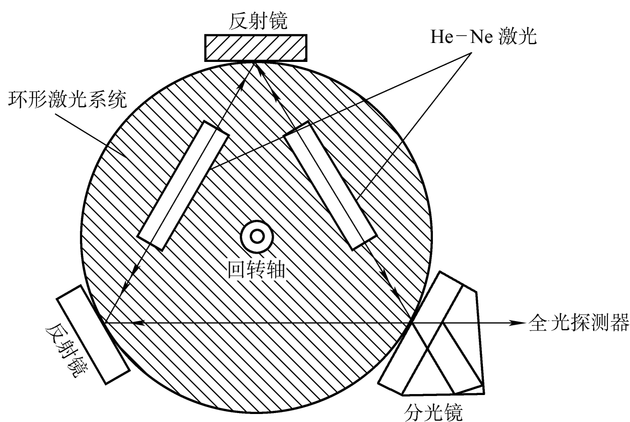



图 4-86　激光陀螺仪的原理图

## 4.18　红外测油仪

随着矿物燃料的大量开采和广泛使用，矿物油对水体和环境的污染已成为一个全球关注的问题，矿物油污染（特别是水体污染）监测问题已引起各国环境保部门的高度重视。各种检测矿物油的仪器和方法也相继问世，其中包括浊度法、超声法、光散射法、重量法、紫外吸收法、非色散红外光度法、红外分光光度法、色谱法、荧光光度法等。

浊度法、超声法、光散射法只能检测水体中的的分散油，但检测不出溶解于水中的低浓度石油烃，而浓度在 1mg/L 以下的矿物油可完全溶于水中；重量法不够灵敏，并会造成低沸点烷烃的损失；紫外吸收法虽然灵敏，但选择性差，不同的油组分在不同波长处有吸收极大值，而许多其他有机物在紫外区也有吸收；非色散红外光度法也存在类似问题，由于矿物油成分（烷烃、环烷烃和芳香烃）中含有分别在 $2930\text{cm}^{-1}$

(—$CH_2$ 中 C—H 伸缩振动)，2960$cm^{-1}$（—$CH_3$ 中 C—H 伸缩振动）和 3030$cm^{-1}$（芳环中 C—H 伸缩振动）处有吸收带的不同组分。若这些组分的相对值发生变化，非色散红外吸收法只在某一波长处进行测量，显然难以测准；红外分光光度法由于可同时或顺序测量上述三个波长处的吸光度（$A_{2930}$、$A_{2960}$、$A_{3030}$），在这三个波长处几乎没有其他物质产生干扰，很容易通过适当计算求得矿物油的总浓度，因而可以避免上述一些方法的缺点；色谱法可对多个组分加以测定，但费时、费事；荧光光度法灵敏度高，甚至可以直接检测出 1mg/L 以下的溶解油，但只对芳烃有效，且容易受其他荧光物质干扰。国外普遍使用的专用测油仪基本上采用非色散红外光度法。红外测油仪适用于水中矿物油、动植物油、土壤中油、油烟中油、半导体器件表面和各种工业产品表面残留油的定量分析。

## 4.18.1 红外测油仪的测量原理

根据国家标准（GB/T 16488—1996)，用四氯化碳按一定的富集比（$E$）萃取水中的油类物质，萃取液按一定稀释比（$D$）定容后直接检测，可得到水中的总含油量。萃取液通过硅酸镁吸附，分离除去极性动植物油类物质，按一定稀释比（$D$）定容后进行检测，可得到水中石油类物质的含量。总含油量与石油类物质含量之差为水中动植物油的含量。测量被测溶液在 2930$cm^{-1}$、2960$cm^{-1}$、3030$cm^{-1}$ 处的吸光度 $A_{2930}$、$A_{2960}$、$A_{3030}$，根据以下公式计算出相应的油含量：

$$C_Z = [X \cdot A_{2930} + Y \cdot A_{2960} + Z(A_{3030} - A_{2930}/F)] \cdot D \cdot b'/E \cdot b$$

式中 $C_Z$——总含油量；

$X$、$Y$、$Z$——与各种 C—H 键吸光度相对应的系数；

$F$——脂肪烃对芳香烃影响的校正因子；

$D$——萃取溶液定容稀释比；

$E$——萃取富集比（水相与有机相四氯化碳体积比)；

$b'$——测定校正系数时吸收池有效光程；

$b$——测定实际样品时吸收池有效光程。

## 4.18.2 红外测油仪的结构

MFA—450 型红外测油仪外观如图 4-87 所示。

仪器结构框图如图 4-88 所示。仪器分为四大部分：光源系统（a)、样品系统（b)、分光和检测系统（c）和附属系统（d)，此外还有检测电路（e)。



图 4-87　MFA—450 型红外测油仪外观图

### 1. 光源系统

光源系统由光源、平面反射镜、球面反射镜、稳光系统和光调制系统构成。光源采用钨卤素灯，其发射特

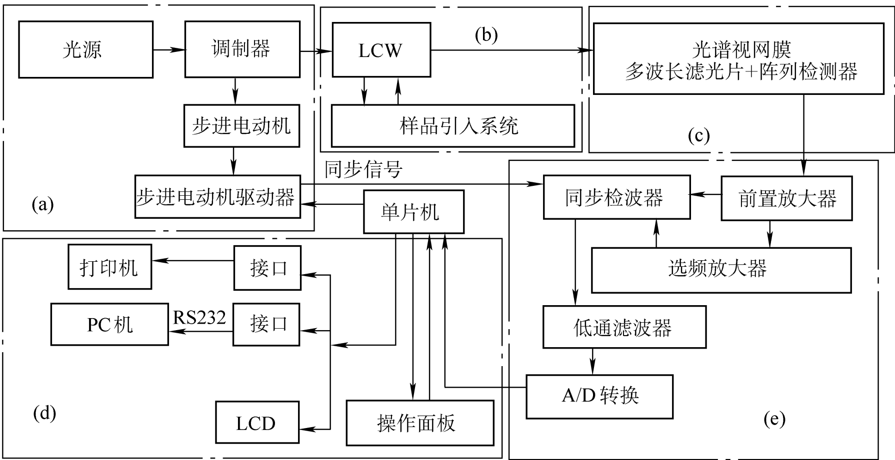



图 4-88　MFA—450 型红外测油仪结构框图

性如图 4-89 所示。从图中可见，在所测波数处有足够的发射度。

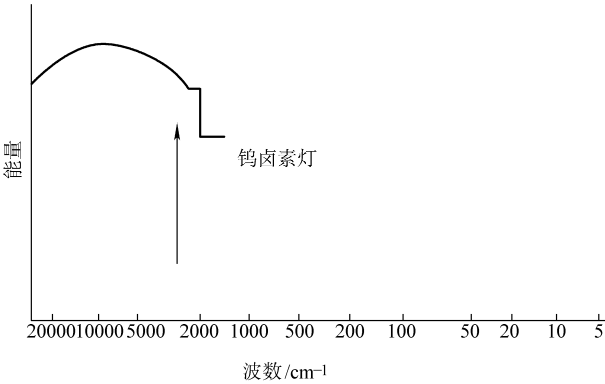



图 4-89　钨卤素灯发射特性

仪器采用了直接稳定光源辐射的稳光技术。稳光系统由透镜、平面反射镜、光电检测器和控制电路构成。稳光系统工作原理见图 4-90。

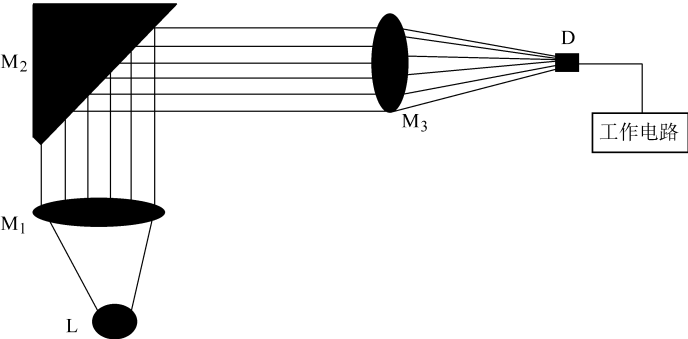



图 4-90　稳光系统工作原理图

L—光源　$M_1$—透镜　$M_2$—反射镜　$M_3$—透镜　D—检测器

照明光路系统提高了光源的利用率。光源调制系统由调制扇、步进电动机、光耦合器、单片机系统和带有晶振的驱动电路等构成，调制频率 12.5Hz。照明光路工作原理如图 4-91 所示。

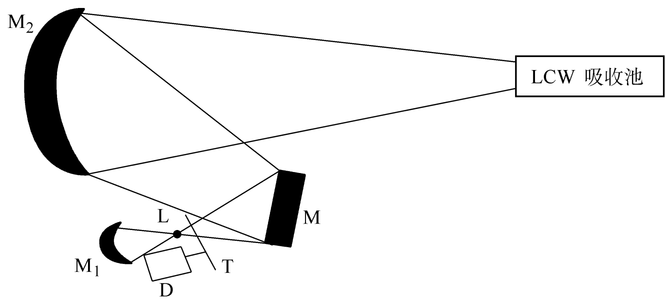



图 4-91　照明光路工作原理图

$M_1$—球面反射镜　L—光源　D—步进电动机　T—调制扇

M—平面反射镜　$M_2$—球面成像物镜

**2. 样品系统**

样品系统由长程液芯波导（LCW）吸收池和样品引入系统构成。由于吸光度值与吸收光程长度呈正比，LCW 长度增加，会提高仪器检测灵敏度，显著降低对矿物油的检出限。LCW 吸收池实际长度为 30cm。样品引入可采用由计算机控制的注射泵系统，也可以采用手动玻璃注射器系统。采取负压引入方式，将样品溶液吸入 LCW 吸收池。LCW 吸收池结构如图 4-92 所示。

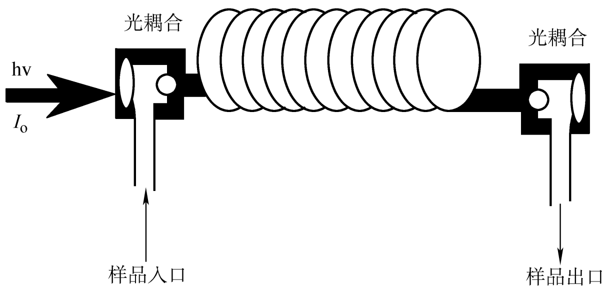



图 4-92　LCW 吸收池结构图

**3. 分光和检测系统**

分光和检测系统采用了多波长滤光片和阵列检测器组成的光谱视网膜技术。根据检测器的特性及原始设计，检测电路包括 5 个子电路：前置放大电路、选频放大电路、同步检波电路、低通滤波电路和 A/D 转换电路。

**4. 附属系统**

附属系统由液晶显示器、微型打印机、控制键盘或 PC 机系统构成。

## 4.18.3　红外测油仪的主要应用领域

1）环保系统、卫生防疫和水文地质部门对地表水（海水油污染的监测国际上还没

有适合 ISO 方法规定的仪器)、地下水、生活用水和工业废水及其他污染体系中石油类(矿物油)、动植物油及总油含量的监测。

2) 烟气(饮食行业油烟) 含油量监测。

3) 农业部门土壤、植物含油量的测定。

4) 日化行业对油类清洗剂性能的测定。

5) 化学化工领域有机试剂纯度的检测及含各种不同 C—H 键有机物总量和分量的测量。

## 4.19　光栅数显表

光栅数显表是一种用于精密测量直线位移的数字化仪表。它与光栅尺传感器共同组成位移测量系统,以其高精度、高分辨率、快速跟踪、抗干扰能力强等特点,越来越受到人们的重视。纵观机械加工行业中,大直径的精确测量始终是一个亟待解决的问题。传统的测量方法不但劳动强度大,而且测量精度低,废品率高,因此,人们一直在探索新的测量方法进行大直径的精确测量。

**1. 具有绝对零位的光栅测量系统的工作原理**

在广泛使用的光栅测量系统中,有一种带有一个或多个绝对零点的系统。利用它的某一个绝对零点,就可以作为测量直径的基准。把光栅尺(主光栅)固定于车床的一侧,而将读数头(指示光栅)与行走机构(车刀架)相连,车刀相对于加工件的位移,可通过光栅尺(传感器)反映出来,传送给数显表显示出实际的加工尺寸。对于某一个确定的绝对零点,在安装时可以精确测出该点相对于圆心的距离 $L$。该点一旦确定,则相对于圆心始终是一个常数。该点作为一个基准,减去或加上该点到刀尖的距离 $H$,即为被加工件的半径 $R_0$ 或直径 $D_0$。实际测量时,数显表可实时记忆 $L$ 值,并通过键盘输入 $H$ 值,然后寻找绝对零点,找到该点后,数显表根据内外径选择开关确定 $D_0$ 值。

测外径时: $D_0 = 2(L - H)$

测内径时: $D_0 = 2(L + H)$

此后,随着工件加工的位移 $x$,数显表便可实时跟踪和显示各时刻的实际直径尺寸(此时相当于在某预置状态下的加工),而在线加工的实际直径 $D$ 为:

$$D = D_0 \pm 2x = 2R = 2(R_0 \pm x)$$

**2. MCS—51 单片机光栅数显表软硬件设计**

为了适应大直径的测量,使用 MCS—51 单片机构成了通用型的光栅数显表,其硬件组成如图 4-93 所示。

光栅传感器输出的位移信号,送入数显表,首先进行放大、整形及电平转换,然后送入细分辨向电路,经细分后的脉冲信号(用以提高系统分辨率)送给 51 单片机内部的两个 16 位计数器($T_0$、$T_1$)计数。而辨向电路要根据运动方向给出方向信号,以控制两个计数器分别作加、减计数,即 CP+、CP-,单片机内部两计数器 $T_0$、$T_1$ 经软件处理后,即可模拟出 16 位可逆计数器的状态值。

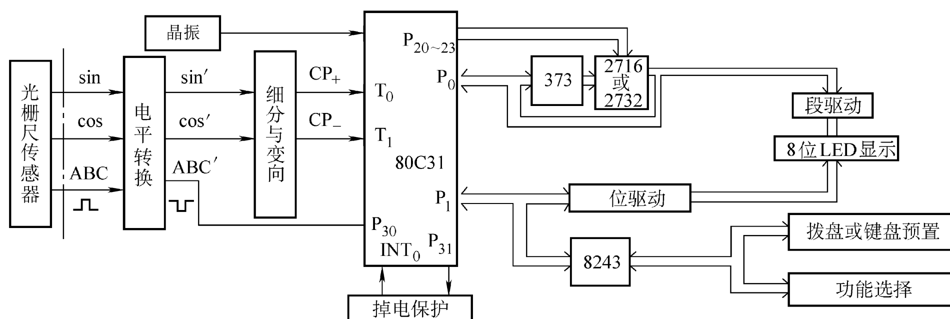



图 4-93　硬件组成框图

该数显表的软件设计采用了模块化的设计方法。设计时考虑到其通用性，既可作为一般情况下的测量，又可作为大直径尺寸的测量。整机复位后，首先要判断是否进行了断电保护，有断电保护要恢复断电前状态，否则进入 8031 初始化。同时还包括有关 RAM 区清零，设定计数器 $T_0$、$T_1$ 状态及计数器清零等工作。

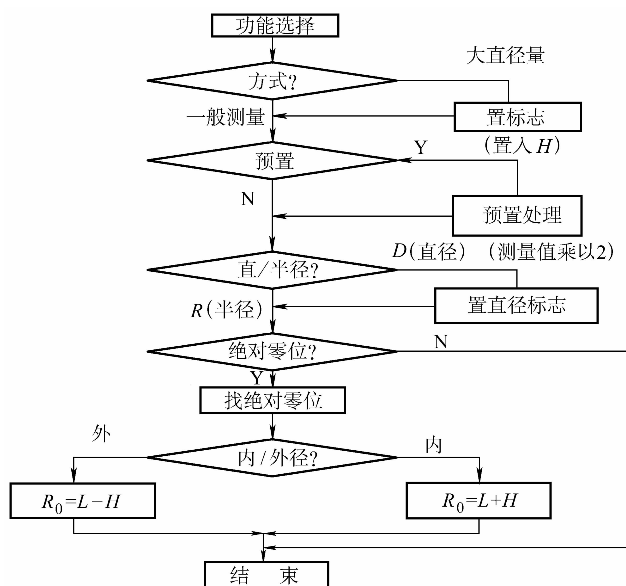



图 4-94　流程图

功能选择部分，完成测量方式选择、预置数、绝对零位寻找及内/外径测量选择等工作，用以确定加工开始前初始（累计）值的设定，这里，直径/半径的选择实际上是设置一个状态标志，处理时在直径状态下只要将半径状态下的测量值乘以 2 即可。以上步骤完成后，将进入数据处理及转换部分。单片机周期性采样计数器 $T_0$、$T_1$ 的计数值，求得各时刻的增量值 $\Delta x_i$，该值与原累计值运算后，便可求出新的累计值。为了将脉冲数转换为位移量还要进行 $N$ 倍乘，然后将二进制数转换为 BCD 数并送显缓区，任意时刻要显示的符号和数字即实际位移量，通过 $P_0$ 和 $P_1$ 口输出它们的字位与字形，实现动态更新显示。大直径测量时，则可直接显示出当前的实际直径尺寸。具体流程如图 4-94 所示。

## 4.20　激光扫描显微镜

激光扫描显微镜的工作原理与扫描电子显微镜相似，它与电子显微镜的不同之处

是用激光束代替电子束工作。经过聚焦的激光束射到样品上，由样品上的反射光形成图像。在激光扫描显微镜中采用了自动聚焦装置，它在样品的每一个像素点上都进行聚焦。每一个调焦值都由计算机储存起来，全部调焦值即构成了立体图像的第三维图像数据信息。由此可见，激光扫描显微镜的最大特点就是能显示出样品真正的（非模拟）三维立体图形，其图像的三维尺度都可以用数值准确的标定。

**1. 自动聚焦原理**

现仅以线扫工作方式为例说明其原理（见图 4-95）。由激光源 a 产生的激光经聚焦后形成激光束 b，穿过半透镜 f 再经物镜 c，聚焦后射到样品 d 上，样品反射光经半透镜反射到棱镜 g，经过差分光电器和放大器 h 后再到控制器 k 和计算机 l。当差分光电器检测出散焦时，通过计算机和控制器调整物镜的距离使聚焦正常。当样品台沿水平方向扫描时，计算机将储存半透镜 f 每一点的调焦值，最后在显示器上构成二维的线扫图形。该图形 $y$ 轴分量表示了样品的高度信息。

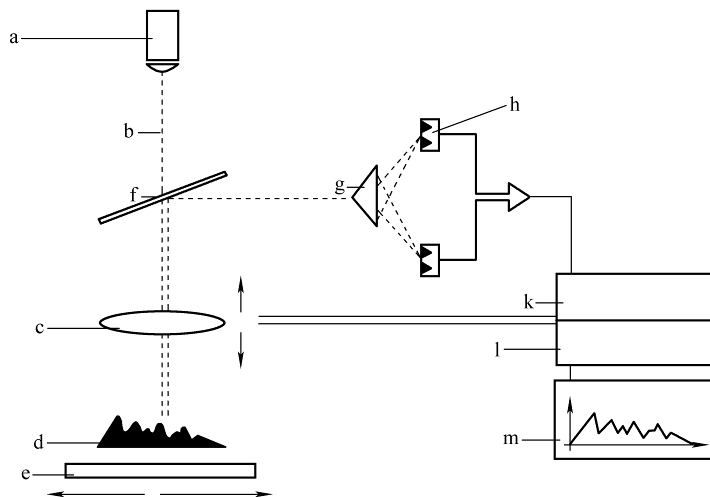



图 4-95　自动聚焦原理图

a—激光源　b—激光束　c—物镜　d—样品　e—样品台　f—半透镜
g—棱镜　h—放大器　k—控制器　l—计算机　m—显示器

**2. 主要工作参数**

工作距离：1 ~ 45mm；测量范围：0.005 ~ 1mm；最高垂直分辨率：1nm。

**3. 特点及应用**

真实的三维图形显示，样品制备简单，大气环境测试观察，图像储存和处理方便，结构简单，故障率小，维护方便。激光扫描显微镜可用于样品的微观形貌观察、表面结构和粗糙度测量、振动和形变的观察。它可广泛用于材料涂层、微器件、薄膜、集成电路等方面的观察与测量分析。

# 第 5 章　在工程机械方面的应用

## 5.1　盾构机

盾构机（Tunnel Boring Machine，TBM）全名叫盾构隧道掘进机，也称为盾构掘进机，是地下暗挖隧道的一种专用工程机械，如图 5-1 所示。现代盾构机集光、机、电、液、控等技术于一体，具有开挖切削土体、输送土碴、拼装隧道衬砌、测量导向纠偏等功能。用盾构机进行隧洞施工具有自动化程度高、施工速度快、开挖时可控制地面沉降、减少对地面建筑物的影响和在水下开挖时不影响水面交通等特点，在地下水位较高、隧洞洞线较长、埋深较大的情况下，用盾构机施工更为经济合理，因而盾构机广泛用于地铁隧道、越江隧道、铁路隧道、水电隧道、市政公路隧道等工程的建设。



图 5-1　盾构机外形

### 5.1.1　盾构机的类型和组成

根据工作原理的不同，盾构机可以分为手掘式盾构机、挤压式盾构机、半机械式盾构机（局部气压、全局气压）和机械式盾构机（开胸式切削盾构机、气压式盾构机、泥水加压盾构机、土压平衡盾构机、混合型盾构机、异型盾构机）；根据适用的土质及工作方式的不同，盾构机可以分为开胸式、压缩空气式、泥水式、土压平衡式、组合式、插板式、多断面式盾构机及微型盾构机等。按直径大小可以分为特大、大、中、小及微型盾构机；按开挖断面分为部分断面开挖和全断面开挖的盾构机等。目前作为主流技术的主要有泥水加压平衡盾构机、土压平衡盾构机、组合式盾构机和微型盾构机等。

土压平衡式盾构机的组成如图 5-2 所示，其基本装置是切削刀盘及其轴承和驱动装置，开挖室及螺旋输送机等。

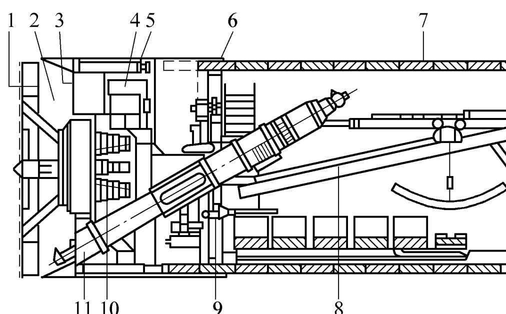



图 5-2　土压平衡式盾构机的组成

1—切削刀盘　2—开挖室　3—承压隔板　4—压缩空气闸室　5—推进千斤顶　6—尾盾密封　7—油箱　8—带式输送机　9—管片拼装机　10—刀盘驱动　11—螺旋输送机

### 1. 切削刀盘

切削刀盘切割开挖面上的土壤和在开挖室内搅拌使之变成可塑的泥土浆。切削刀盘前面一般布置有添加土壤改良剂料的灌注口，对开挖面上的土壤进行改良处理。切削刀盘盘面有封闭式和敞开式两种。封闭式切削刀盘是用于开挖面不稳定的土层类型，这样可以避免在开挖面有大量的土壤松动。切削刀盘上开口的比率在保证系统稳定的前提下可以根据实际需要而变化。开口的宽度限制了螺旋输送机中可以输送的最大石块的尺寸。大的石块需在切削刀盘前压碎到与开口缝隙尺寸相配，这样可以避免损坏螺旋输送机。封闭式切削刀盘的一个缺点是在开挖面上支撑压力的分布不均匀。承压隔板上测得的土压值不一定就是真实值，它还与刀盘的位置和转向有关。

### 2. 轴承和驱动部件

在土压平衡式盾构机中，轴承的密封系统和易于拆换非常重要，因为这些部件在磨蚀性强的土层中会受到很大的机械应力，易造成密封区域的严重损坏。在结构上一般分为中心轴驱动方式和非中心轴驱动方式。

中心轴驱动部件的封闭或敞开式切削刀盘是一种比较简单的设计，在开挖室内不需要什么处理，也没什么障碍物。同时所有密封都可以从盾构机上接触到，易于修复。中心轴驱动部件的缺点是盾构中心被切削刀盘部件占满，使螺旋输送机的安装坡度特别小，这必然导致盾构机的加长。

非中心轴驱动部件的封闭或敞开式切削刀盘驱动轴承的直径约为盾构直径的一半。切削刀盘有单独的支架支承。优点是导引稳定、不易阻塞，且支承支架能起一定的搅拌作用，并可以从盾构区域接近密封系统。

### 3. 开挖室

土压平衡式盾构机的刀盘切削面与后面的承压隔板所形成的空间为开挖室。在这里从开挖面挖出的土料转变成有良好的变形性的可塑土浆（假如在开挖面的开挖中还没做到这一点的话），以保证在开挖面有稳定的支撑压力。

挖掘工作腔室的设计由螺旋输送机、压缩空气室（如果有的话）和切削刀盘驱动部件的位置决定。开挖室的设计应顺应土料流动以避免土料聚集，保证土料持续地流

到螺旋输送机中。

开挖室的长度决定了与推进速率相关的土料留在室内的时间。开挖室还可根据需要布置一些搅拌机构，对土料进行搅拌。对大直径盾构机，堵塞的危险性较大（尤其在开挖室中部），因为旋转搅拌工具的转速越靠中间越低。当切削刀盘的一般转速为 1 ~2m/min 时，搅拌机构对靠近开挖室中心的部位不起作用，因此在中心部位应设置可以独立旋转的切削或搅拌装置。

**4. 螺旋输送机**

在土压平衡式盾构机中，螺旋输送机具有以下功能：从有压力的开挖室内将土料送到大气压下的隧洞中；在渗水土层中密封有压水；通过控制开挖土料的进出量来控制开挖室的支撑压力。

螺旋输送机是一个连续工作的系统，由可旋转的螺旋叶片和静止螺旋叶片外壳组成。螺旋叶片一般是装配在旋转轴上，但也可以设计成没有中心轴以便在中心输送较大的石块。

螺旋输送机的驱动可以布置在中心（轴）或周向边缘。中心驱动时，土料从圆柱体外壳的一扇门送出，而周向边缘驱动时，土料可以从圆柱体外壳的端部送出。

螺旋输送机的圆柱形壳体有一段是可以伸缩的。它伸到开挖室内部，可以改善土料的供应。由于存在摩擦，在壳体内的土料不能旋转，只能作轴向移动。

螺旋输送机的安装位置较低时更好用，因为土料是利用其自身重量压入螺旋输送机开口中的。当螺旋输送机位于中心时，必须将在开挖室下部的土料向上压送以克服重力作用。若螺旋输送机位于更低的位置，使用压缩空气将开挖室内的土料向低位压送没什么问题，因此压缩空气气室的位置越高越好。

## 5.1.2 土压平衡式盾构机工作原理

土压平衡式盾构掘进机的掘进原理是在推力的作用下，刀盘切削土体，通过调节螺旋机的转速、控制土室的排土量，达到土室与开挖面的土压力动态平衡。它是目前国际、国内隧道施工的主力机型，其工作原理如图 5-3 所示。

当盾构机在不稳定的地层中掘进时，可以通过制造支撑压力来防止隧道掌子面失稳情况的发生。使用土压平衡盾构机开挖，切削刀盘 1 开挖下来的粘性土体用来支撑掌子面，而不像通过其他开挖方式的盾构机，其掌子面依靠另外的介质支撑。刀盘旋转的盾体区域称为开挖室 2，它通过承压隔板 3 与常压下的盾体区域分开。刀盘旋转，带动刀具挖掘土壤。挖掘下来的土壤通过刀盘开口进入开挖室，与开挖室内已有的粘性土浆混合。推进液压缸 4 的推力通过压力挡板传给开挖室内土体，从而保证开挖面的稳定。当开挖室内的土体不再受外部土压力和水压力压紧时，就达到了土压平衡。

开挖仓内的渣土通过螺旋输送机 5 输送出去。渣土输送量由螺旋速度和上部螺旋输送机驱动器的开口十字架控制。螺旋输送机把渣土输送到第一段输送带上，再转运到反转带上。当输送带反方向输送时，渣土被倾倒进入运输渣车中。隧道通常使用预应力钢筋混凝土管片 7 进行衬砌。管片在常压下通过管片拼装机 6 安装在盾体区域的压力室壁后面，然后用螺栓临时固定。砂浆经由盾尾上的注浆口或直接通过管片上的

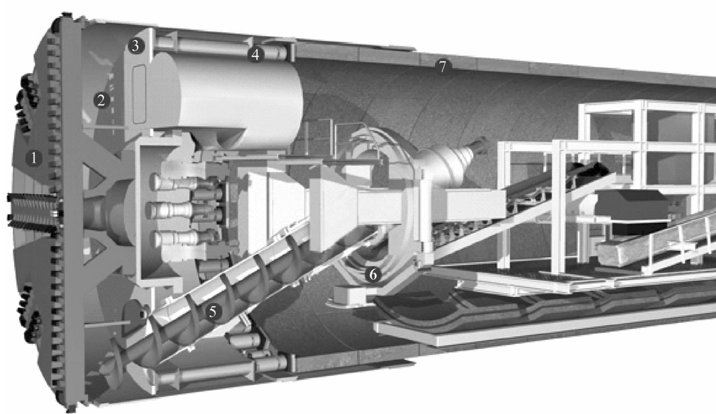



图 5-3　土压平衡式盾构机的工作原理

1—切削刀盘　2—开挖室　3—承压隔板　4—液压缸　5—螺旋输送机　6—管片拼装机　7—管片

开口连续注入管片外面和围岩之间的空隙。

**1. 盾构测控系统**

（1）盾构控制系统　图 5-4 为某盾构控制系统，其主要由 PLC 可控制编程控制器和显示操作终端机组成。PLC 采用主从结构，有 1 个主站和 2 个从站，另有一套注浆 PLC。PLC 主站设在控制台，主 CPU 带 3 个显示操作终端机，编号为 GC1、GC2、GC7。其中 GC1、GC2 分别操作盾构设备，互为备用，GC7 操作加泥设备。1#从站设在盾构内，带 3 个显示操作终端机，编号为 GC3 ~ GC5。其中 GC3、GC4 操作盾构千斤顶，GC5 远程操作注浆。2#从站设在 2#车架上，带 1 个显示操作终端机（即触摸屏），编号为 GC6，操作注浆设备。

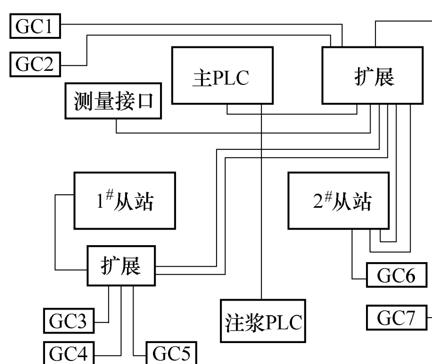



图 5-4　盾构控制系统图

主站同 1#、2#从站通过两个并行的电缆环路连接（双环网）。系统采用了高速可靠的数据通信，即 MELSECNET/Ⅱ数据通信系统。它采用 2 个并行的电缆环路连接各 PLC 站，其中一个称为正向环路（或主环路），另一个称为反向环路（或副环路）。当主环路内发生电缆断裂时，通信自动切换到副环路，继续保持数据通信；如果 2 个环路均断裂或者均脱接，除断裂的 PLC，连接的站之间仍继续保持通信。

注浆 PLC 独立于 PLC 系统外，通过 I/O 口同 PLC 主站进行信号的交换。PLC 配置了开关量输入/输出组件、模拟量输入/输出组件、通信接口组件和计算机通信组件。

（2）姿态测控系统　盾构机姿态是指盾构机前端刀盘中心三维坐标和盾构机筒体中心轴线在三个相互垂直平面内的转角等参数。盾构的姿态测控系统由盾构和地面两部分组成。盾构部分主要由全站仪、棱镜、测量接口、控制单元、计算机（显示器）

等设备组成。地面部分主要由计算机（显示器）和集线器等设备组成。盾构与地面部分通过一对兆比特调制解调器（SDSL）进行信号的联接，如图 5-5 所示。该系统通过高精度的测量仪器和专用软件来实现盾构姿态的自动测量，可以取得的实时数据信息有：

1）后视点、站的坐标和登录名称。

2）测量目标的数据。

3）测量时的盾构俯角和转角。

4）盾构前、中、后的坐标值，方位偏差等计算结果。

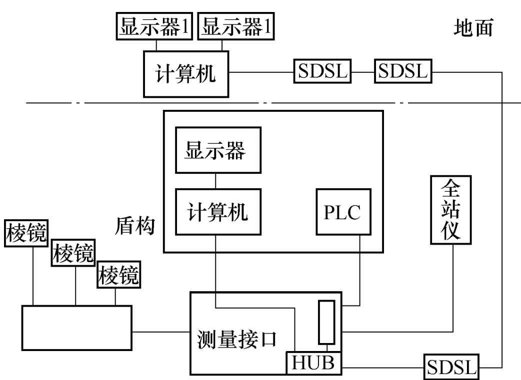



图 5-5　姿态测控系统

在盾构内，全站仪测量得到的姿态信号和 PLC 获取的盾构施工信号在测量接口单元中集成在一起，在盾构计算机显示器上显示，并送地面计算机。

（3）检测系统　根据盾构测控系统的需求，配置了基本的检测仪器，检测的模拟量信号有土仓土压力，推进千斤顶油压、行程、速度，四区油压，螺旋机油压、转速，铰接千斤顶行程，刀盘变频器输出功率，刀盘密封温度，螺旋机闸门开度，注浆压力，注浆桶浆液位，泡沫压力，加泥压力，加泥流量，盾构的坡度和转角等。配置的传感器（变送器）共有 40 多套，见表 5-1。

**表 5-1　传感器一览表**

| 序号 | 名称 | 数量 | 量程 | 用途 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 土压传感器（放大） | 4 | 0 ~ 0.5MPa | 土仓土压力 |
| 2 | 倾斜仪倾角 | 1 | -5 ~ +5° | 盾构姿态 |
| 3 | 倾斜仪转角 | 1 | -5 ~ +5° | 盾构姿态 |
| 4 | 测速仪 | 1 | 0 ~ 25r/min | 螺旋机转速 |
| 5 | 行程仪 | 3 | 0 ~ 2000mm | 推进千斤顶行程（上，左，右） |
| 6 | 测速仪 | 3 | 0 ~ 10m/min | 推进速度（上，左，右） |
| 7 | 温度计 | 2 | 0 ~ 100℃ | 刀盘密封温度 |
| 8 | 压力传感器（放大） | 4 | 0 ~ 5MPa | 1″ ~ 4″注浆压力 |
| 9 | 压力传感器 | 5 | 0 ~ 45MPa | 四区油压力螺旋机油压 |
| 10 | 拉线行程仪 | 2 | 0 ~ 700mm | 1″，2″闸门开度 |
| 11 | 行程仪 | 4 | 0 ~ 200mm | 1″ ~ 4″铰接千斤顶行程 |
| 12 | 功率变送器 | 5 | 0 ~ 180kW | 刀盘变频器输出功率 |
| 13 | 液位计 | 1 | 200 ~ 2000mm | 注浆桶浆液位 |
| 14 | 液量计 | 1 | 0 ~ 200L/min | 加泥流量 |
| 15 | 压力变送器 | 4 | 0 ~ 5MPa | 1#，2#泡沫压力 |

另外，对开关量信号的检测，配置了 60 余个限位继电器和 10 多个压力继电器。

主要检测拼装机回转左/右限位状态，拼装机电缆盘左/右限位状态，螺旋机的伸/缩状态，螺旋机闸门的开/关状态，气阀、加泥阀、注浆阀、盾尾密封阀的开/闭状态，集中润滑的油脂油位，盾尾油脂油位等，以及集中润滑油脂泵和管道的压力高/低，盾尾密封油压高低，稀油润滑堵塞等信号。

**2. 盾构机激光导向系统**

激光导向系统是综合运用测绘技术、激光传感技术、计算机技术及机械电子等技术指导盾构隧道施工的有机体系。系统由激光全站仪、信号传输和供电装置、激光接收靶、棱镜和定向点、盾构机主控室和液压缸杆伸长量测量装置等组成。盾构机主控室由程控计算机（预装隧道掘进软件，具有显示和操作面板）、控制盒、网络传输 MODEM 和可编程逻辑控制器（PLC）四部分组成，其中，隧道掘进软件是盾构机激光导向系统的核心。

地铁盾构法施工过程如图 5-6 所示。在隧道掘进模式下，激光导向系统是实时动态监测和调整盾构机的掘进状态，保持盾构机沿设计隧道轴线前进的工具之一。在整个盾构施工过程中，激光导向系统起着极其重要的作用。

1）在显示面板上动态显示盾构机轴线相对于隧道设计轴线的准确位置，报告掘进状态；并在一定模式下，自动调整或指导操作者人工调整盾构机掘进的姿态，使盾构机沿隧道设计轴线附近掘进。

2）获取掘进姿态及最前端已装环片状态，指导环片安装。

3）通过标准的隧道设计几何元素自动计算隧道的理论轴线坐标。

4）和地面计算机相连，对盾构机的掘进姿态进行远程实时监控。

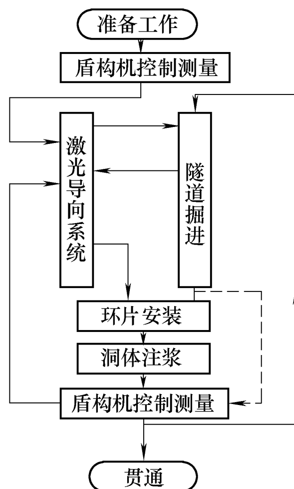


图 5-6　盾构施工基本过程

从图 5-6 的盾构施工基本过程图可以看出，激光导向系统不能够独立完成导向任务，在盾构机始发、该系统启用之前，还需要做一些辅助工作。首先，激光全站仪首次设站点及其定向点坐标，需用人工测定。其次，必须使用人工测量的方法，对盾构机姿态初值进行精确测定，以便对激光导向系统中有关初始参数（如激光标靶上棱镜的坐标，内部的光栅初始位置及两竖角测量仪初值等）进行配置。

盾构机姿态除了可以通过人工测量、单独解算方式获得外，还可以由导向系统实时、自动地获取。用人工测量方式获得盾构机姿态的过程，被称作“盾构机控制测量”。盾构机控制测量的另一个作用是在盾构机掘进过程的间隙，对激光导向系统采集的盾构机姿态参数进行检核，对激光导向系统中有关配置参数进行校正。

## 5.1.3　主要盾构技术与方法

盾构施工法是在地面下暗挖隧洞的一种施工方法，它使用盾构机在地下掘进，在

防止开挖面崩塌或保持开挖面稳定的同时，在机内安全地进行隧洞的开挖和衬砌工作。目前，许多盾构掘进技术与方法都已比较成熟和可靠。

1）泥土加压盾构法。适用的土壤类型较为广泛，如沙质、砾石质、粘土质等。

2）气泡盾构法。适用于各种类型的土壤。

3）挤压混凝土衬砌法。既可保证高质量的隧道衬砌，还能控制开挖时的地面沉降，适于土质较好的土层。

4）多圆面盾构法。通过圆形截面的各种组合，可以构筑各种断面的隧道。

5）双圆盾构法。可以更加有效地节省和利用地下空间，可以构筑垂直和水平双圆断面隧道。

6）扩径盾构法。施工中可以对隧道的部分区间径向扩展以提高地下空间利用率，还可以在多种盾构方法之间进行转换。

7）球体盾构法。可以进行“垂直－水平”或“水平－水平”方向的连续掘进，可以大大提高施工效率。

8）H 和 V 型分叉盾构法。施工过程中可以从水平双孔变为垂直双孔，或者从垂直双孔变为水平双孔，可以根据设计要求不断地改变断面形状。

9）MSD 盾构法（Mechanical Shield Docking Method）。一种采用地下机械对接的盾构施工法，安全可靠，隧道开挖点选择自由度较大。

10）JIYU—DAMMEN 盾构法。通过采用行星刀盘及对其扇动臂的调节可以开挖矩形、椭圆形、马蹄形、卵形等各种非圆形断面的隧道，从而可以更有效地利用地下空间。

11）DPLEX 盾构法。通过采用独特的开挖机构，可以开挖各种断面形状（矩形、椭圆形等）的隧道，可以进行大断面、长距离的盾构。

12）CPS 盾构法（Chemical Plug Shield Method）。在高水压下，可以利用泥水压进行很深的砂砾层的隧道挖掘。

13）预应力和预制混凝土管片衬砌盾构法。采用隧道轴向预应力和预制混凝土管片衬砌，可以开挖出经济、高质量的抗震隧道。

14）摇摆式刀具盾构法。通过采用刀具摇摆系统，可以将盾构机设计得非常紧凑，可灵活地使用于各种断面的隧道挖掘。

近年来还涌现了一些新的盾构方法，如日本 Naka Ochiai 隧道的盾构法、集成盾构法、双千斤顶管片盾构法、污泥垂直气力输送法及快速管片盾构法等。

## 5.2 枕式包装机

枕式包装机是一种包装能力强，适合多种规格的，用于食品和非食品包装的连续式包装机。它不但能用于无商标包装材料的包装，而且能够使用预先印有商标图案的卷筒材料进行高速包装。

在包装生产中，由于包装材料上印刷的定位色标之间存在误差，包装材料的拉伸及机械传动等因素的影响，包装材料上预定的封切部位有可能偏离正确的位置，从而

产生误差。为了消除误差而达到正确封切，包装设计必须考虑自动定位问题，这应该根据包装材料的定位标，完成连续式光电自动定位系统设计。

连续式光电定位系统按误差补偿工作方式，可以分为进退式、制动式和两传动系统同步式。

## 5.2.1　制动式光电自动定位系统的基本原理

包装纸在自动包装机上连续进给、成形制袋、充填和封口的过程中，由于定位色标的印刷误差，机器运转的偶然波动以及操作等综合因素，会使得包装纸的输送速度与横封、切纸速度不同步而产生封、切位置的偏差，因此需要随时予以校正，连续地进行误差补偿。

综合误差是个变量，但对于具较高质量和印刷精度的包装材料来说，在一定的包装速度下，这个误差在检测的各个周期内应保持在很小的范围内。这样就能通过光电定位系统定期地测量和比较送纸速度和封切速度。如果包装纸输送过快，正误差系统给出一个负的补偿量，即送纸机构减速来达到补偿；如果包装纸输送过慢，是一个负误差，系统给出一个正的补偿量，使送纸机构增速。但是给定的补偿值不可能完全消除误差，可能补偿过头，也可能不足。即使误差被消除了，下次还会出现。

因此设计总是使系统给予补偿过头一点，给定一个稍大于绝对误差值的补偿量，人为地使它超差。当这次测定误差为负，则补偿一个过量的正值。下一次测定、比较之后必定出现正的误差。定位系统自动地补偿一个给定的负值之后，又恢复出现负误差。如此循环，正负交替使误差控制在一定范围内。这样包装纸的切断部位就在正确的位置附近跳动。这种包装纸一进一退来达到连续定位的方式称为“进退式”自动定位方式。因为它的补偿量是超越离合器工作，把机械送纸机构进入工作时设计成具有包装纸滞后效果来给出的，所以采用这种原理定位的系统称为“制动进退式”自动光电定位系统。以决定包装纸速度的横向封、切速度作为参考基准，以调整送纸速度与之同步来控制包装纸的封切位置误差，这就是连续定位系统最基本的原理。

## 5.2.2　制动进退式定位系统

带有制动进退式光电定位系统的包装机传动系统如图 5-7 所示。

包装过程如下：片状包装纸由卷筒 1 引出，经光电检测器 2 再由成形器 5 成形和牵引辊 6，纵封辊 7 制成包装。已充填包装物的包装袋上下整形输出，经输送带送到横封头 8 横封并切断排出成品。传动部分是：主电机 M1 将运动传入横封传动轴，再经不等速机构 9 带动横封头传动，不等速机构用来调整横封头 8 的封切瞬时速度，使之与包装袋移动速度同步。另一路则经无级变速差动机构 12 的调节，可以手动或通过单相伺服电动机控制完成。调节无级变速差动机构 12 可以得到所需袋长。最后一路经差动机构 19 到钩爪输送链。差动机构 19 为自动调整机构，主要用来调节钩爪输送链与横封头同步。

在包装过程中，用光电传感器检测包装纸移动速度与横封速度作比较，判别它是慢是快，通过超越离合器电气系统控制超越电机 M3 动作使之运转或制动停止，以达到

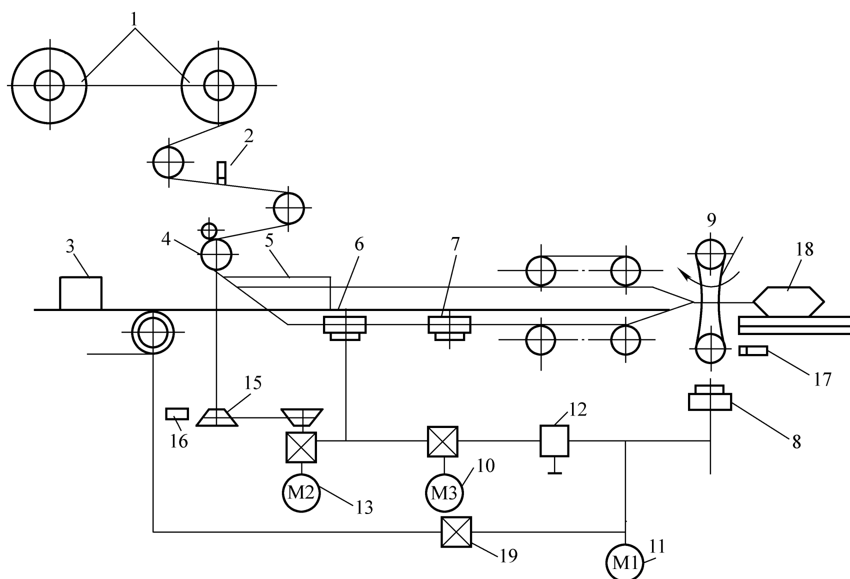



图 5-7　包装机传动系统图

1—卷筒　2—反射光电检测器　3—包装物　4—下纸辊轮　5—成形器　6—牵引辊
7—纵封辊　8—横封头　9—不等速机构　10—超越离合器　11—主电动机
12—无级变速差动机构　13—伺服电动机　14—输送机构　15—调速机构
16—送纸光电传感器　17—横封光电传感器　18—成品　19—钩爪差动机构

误差补偿的目的。

## 5.2.3　速度检测与包装纸长度测量

为保证包装过程中的精确定位，送纸速度与横封切口速度是必须准确测量的两个参数，同时生产过程中包装纸（每张）有长有短，从而如何在定位过程中自动测定包装纸长度使之与我们生产设定相符合，也是非常重要的。

纸速的测量是由图 5-7 所示的送纸光电传感器 16 来完成的。我们把测量纸速的光电传感器输出的脉冲周期记为 $T_{纸}$，它的倒数 $1/T_{纸}$ 即为送纸辊的传动速度。横封切口速度是由光电传感器来测量的。我们把刀切速度光电传感器输出的脉冲周期记为 $T_{刀}$，它的倒数 $1/T_{刀}$ 即为横封速度间接计算得到的。在包装设计中，包装纸被紧压在送纸辊上，压辊的线速度则为包装纸的送纸速度

$$V_{纸}=\frac{\pi D}{T_{纸}}$$

式中，$D$ 为送纸辊直径。经过横封切口后的被切长度

$$L_{纸}=V_{纸}\ T_{刀}=\frac{\pi D T_{刀}}{T_{纸}}$$

## 5.2.4　色标对标方法与调整

为保证包装全自动定位，需要控制伺服电动机 13 使送纸速度与横封头切口速度同

步。然而对设计为同步的系统，由于运转的偶然波动及操作扰动等方面因素都会使原来系统不同步。从而需要在基本同步的系统中加入色标检测与控制电路，随时校正，连续进行误差补偿，保证切封位置不变。这就需要借助包装纸上的色标来定位完成。色标定位对标对包装材料、光电检测方法、色标的印刷等都提出一定的要求。就包装材料而言，要求有较高的密度，滑度、厚度均匀，而且要有一定的抗拉伸能力。光电检测方法因不同的包装材料有透射式和反射式两种。透射式多用于透明包装材料的检测，而反射式则用于难以透光或不能透光的包装材料的检测。通常高速度的包装机设计，大多采用反射式光电检测方法，因为它具有较高的检测灵敏度。对色标印刷要求，定位色标必须能有遮光或通光的作用，同时随包装产品的大小和检测方法的不同，定位色标要有足够的遮光面积，以保证光电检测时信号的可靠性。有了良好的包装材料，合适的定位色标，并采用正确的光电遮光反射式传感器测量色标方法，就可以进行色标对标与调整。

## 5.3　水泥智能包装机

水泥装袋计量是水泥厂生产工艺中的重要组成部分，是水泥厂计量水平的标志之一。我国最早的水泥包装机是采用螺旋铰刀推进下料，装袋后再过磅复秤。由于复秤工作量大，加之人工责任等因素的影响，致使计量不准，水泥耗损量大。我国早期设计制造的固定式包装机，采用平衡杠杆配重式机构称量。由于支点采用刀口支承，易磨损且配重易结灰，影响计量精度，有时误差达 ±6.00kg/袋。后来又研制出了微机控制包装机，其主要原理是在固定式包装机的基础上去掉了刀口及平衡块，用重量传感器悬挂原称量架。因为原称量架与机体采用铰连接，位移量较大，所以虽采用微机控制，其称量精度仍不理想，误差范围为 ±3.0～4.0kg/袋。而新型固定式水泥智能包装机——SBJ-Ⅲ，将最新称量结构与高可靠电路相结合，采用进口大规模集成电路，提高了水泥包装的自动化程度，使袋重精度控制在 ±0.5kg 以内，十袋平均误差小于 ±0.25kg。

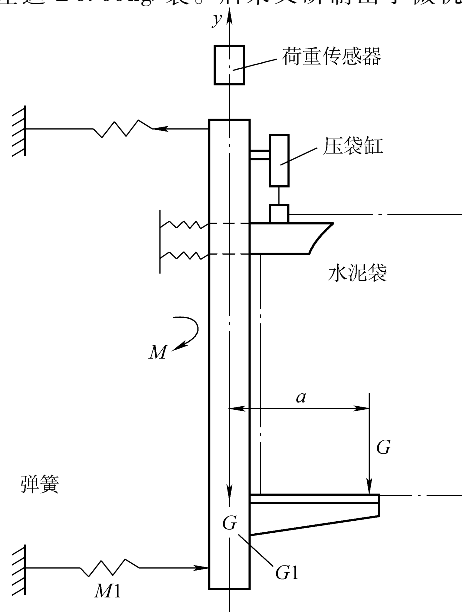


图 5-8　SBJ-Ⅲ水泥智能包装机秤架示意图

### 5.3.1　秤架原理

图 5-8 为 SBJ-Ⅲ水泥智能包装机秤架示意图。设水泥装袋时重量为一集中力 $G$，距 $Y$ 轴距离为一任意数 $a$。根据力的平移定律，$G_1 = G$，$M = aG$。由于 $M$ 对弹簧的作用，产生一反向力距 $M$，根据物体平衡

定理，大小相等，方向相反，即 $M_1 - M = 0$

$$M_1 = M = aG$$

所以荷重传感器只受到水泥袋重的影响，这样就保证了传感器送给微机的信号准确。

## 5.3.2 水泥智能包装机的系统构成

SBJ-Ⅲ水泥智能包装机系统由机械、电气、气动三大部组成，三部分之间是由电控制气，气操作机械部分来完成每一个工作过程。

机械部分包括机架、料斗、秤体和推袋架等部分。气动部分包括电磁阀、各种气阀、气缸等。电气部分包括智能控制系统、电气系统等。结构示意图如图 5-9 所示。

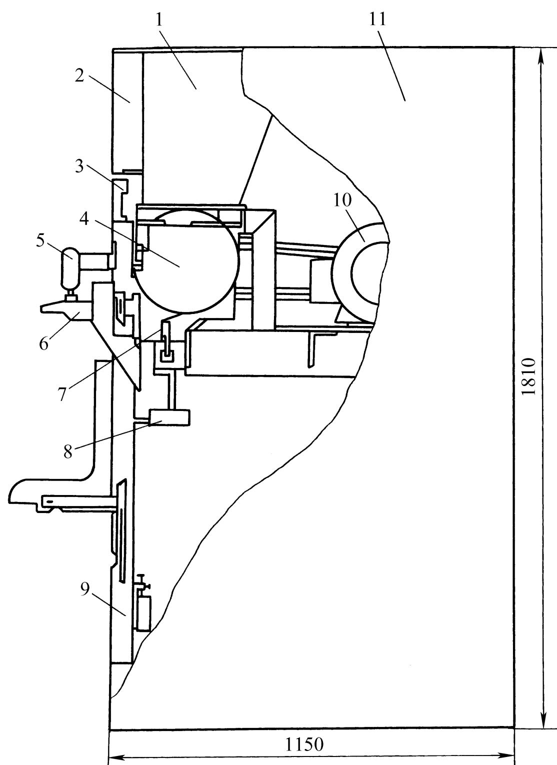



图 5-9 SBJ-Ⅲ智能包装机结构示意图

1—料斗 2—机架 3—传感器 4—下料器 5—压袋阀 6—料嘴 7—闸板 8—推袋阀 9—称量架 10—电动机 11—外壳

## 5.3.3 水泥智能包装机的工作过程

SBJ-Ⅲ包装机的压袋、推袋、关闭出料口均是气动控制的。人工插袋后碰到行程开关，微机开始自动包装计量。压袋气缸、料口缸动作，电动机开始给料。当装到 50kg 时，出料口关闭，压袋松开，推袋缸动作，整个装袋过程结束。因装袋速度很快（约 8s/袋），冲量很大，为确保计量精度，SBJ-Ⅲ在装袋时设定了 3 个目标值：

1）当量达到目标 1 时（设 45kg），料口自动关闭 2/3，慢速加料 5kg。

2）当达到目标 2 时（设 50kg），分料口全部关闭，装袋结束。

3）实际袋重与给定袋重的平均值作为目标 3，微机根据目标 3 自动调整目标 2，使每袋的重量及 10 袋的平均重量都严格地控制在标准以内。实践证明，这是提高计量精度的有效措施。

SBJ-Ⅲ的工作过程是系统加电后数码显示板显示 A/D 值，并且启/停指示灯不停地闪烁，按启停键，启/停键指示灯停止闪烁，显示面板上均为零，然后将袋子插入出料口，碰到行程开关机器开始工作。粗/细流电磁阀、压袋电磁阀、吹气电磁阀随即动

作，出料口闸板打开，压袋缸将袋子固定，整个装袋过程开始。当重量达到 45kg 时，粗流电磁阀动作，闸板关掉出料口 2/3 左右，细流电磁阀开始装袋。当重量达到 50kg 时，细流电磁阀动作，闸板将出料口全部关掉，吹气阀停止，压袋缸复位，推袋气缸动作，由推袋架将袋子推落，至此，完成一个装袋过程，整个过程自插袋后全部自动完成。若前一过程完成后 5s 内不插袋，电动机自动停止运转。下一个装袋过程，从插袋工插入又一个袋碰触行程开关开始。

# 5.4　全自动液体包装机

传统的中小型包装机，尤其是立式包装机都是机械传动，从拉袋、热封到计量充填、切断，全部采用机械机构。随着社会进步和科学技术技的发展，人们对包装效果和包装机本身都提出了更高的要求。计算机的迅猛发展又为包装机的进步提供了可靠的技术保证。由于传统的机械传动结构很难实现全自动控制，于是，便于实现电脑自动控制的元件——气动元件被应用到包装机的设计当中。

全自动液体包装机突破传统包装机的架构，采用气动元件代替机械传动，由步进电动机直接驱动拉袋系统，由可编程控制器集中控制，调整环节少，效率高，可靠性强。

## 5.4.1　全自动液体包装机的工作原理

全自动液体包装机打破传统包装机由一台主电动机驱动所有运动的格局，取消主电动机。热封、计量、充填、切断采用气缸驱动。

包装机的组成如图 5-10 所示，由气缸 1 带动计量充填泵 2，实现从料斗 4 中取料、计量、充填的功能。换向阀 3 控制泵 2，取料时接通出料斗，充填时接通出料管。气缸 6 带动回抽泵 5，对充填后留在出料管中的物料进行回抽，充填时一同充填进包装袋内。

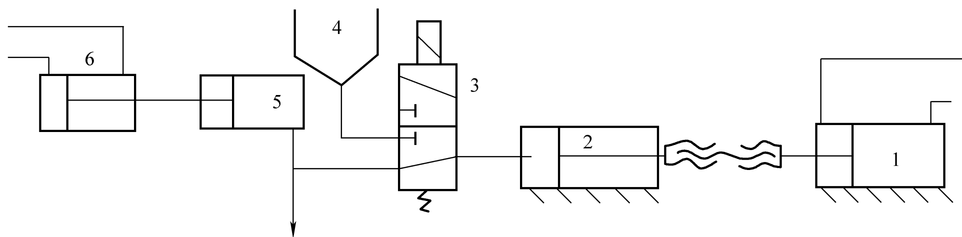



图 5-10　全自动液体包装机的组成

1，6—气缸　2—计量充填泵　3—换向阀　4—料斗　5—回抽泵

## 5.4.2　全自动液体包装机的控制系统

如图 5-11 所示，当可编程控制器收到工作信号时，就控制步进电动机开始拉袋，当步进电动机完成设定脉冲后，拉袋停止；若是有光电眼，当检测到光标就反馈到可

编程控制器控制步进电动机停止拉袋。同时控制热封气缸，切断气缸及计量换向阀，计量充填气缸动作，完成制袋、计量、切断。间隔 $2.5\times10^{-2}$s 后，控制计量充填气缸，回抽气缸动作，完成充填；间隔 $1\times10^{-2}$s 后，控制计量换向阀，回抽气缸，切断气缸动作，完成回抽，切断气缸返回；间隔 $0.1\times10^{-2}$s 后，热封气缸返回，下一个循环开始。

可通过改变切断信号实现任意连（纵向连接）包的切断（多连包）或不切断。

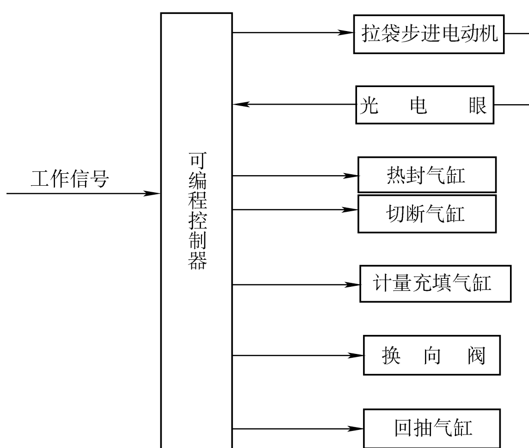



图 5-11　自动液体包装机的控制系统

## 5.4.3　全自动液体包装机的技术指标

1）包装速度：120 包/min。
2）制袋长度：40～80mm。
3）制袋宽度：35～60mm。
4）包装容量：12～15 mL。

## 5.4.4　全自动液体包装机的性能特点

1）生产效率高。由于采用气动元件使得各动作的速度大大加快，气缸的动作时间都以1/100s为单位，因此，比传统包装机速度快一倍。影响包装速度的是拉袋时间和热封时间。

2）制袋精度高。本机由于采用步进电动机拉袋，光电眼“闭环”控制使得包装袋图案完整率相当度可达到99.8%以上。数控拉袋精度、重复精度也比较高，制袋精度可达到±0.5mm。

3）可靠性高。本机采用可编控制器，抗干扰能力强。经多个用户的使用考核，证明其性能稳定，工作可靠。

4）产品合格率高。由于本机设计有回抽泵，杜绝了“夹料”现象，使得本机生产的产品合格率可达99.5%以上。

5）操作简单。本机的控制程序在出厂时已调好，顾客只需调袋长和包装量，没有其他调整环节。

①　袋长调整。数字控制：只需输入所需袋长的毫米值。光标控制：只需打开“光标”控制开关即可。

②　计量调整。粗调：只需调整联接计量泵和计量充填气缸之间的螺杆，使指针指到所需包装量即可试包；微调：试包后，称量样包，根据偏差值进行微调，每个刻度0.1mL。

## 5.5　高温线材打捆机

线材是冶金行业的重要产品之一。国内线材包装长期以来都采用手工包装方式：生产工人往往头带面罩，手执捆丝，站立在作业线旁，对仍处于高温状态 700～900℃的盘卷进行手工捆扎，工作环境十分恶劣，且包装质量得不到保证。

### 5.5.1　打捆机的工作原理

打捆机的工作是围绕冷捆丝进行的。送丝时，冷捆丝穿行的路径为：送丝轮→水平导丝管→水平臂→导丝臂→垂直臂→垂直导丝管，如图 5-12 所示。其中，圆弧 LMN 为捆丝头沿导丝臂穿行的轨迹。被捆扎的盘卷，其内径为 700mm，外径为 1200mm，最大高度为 300m，单盘质量为 160～180 kg，温度为 700～900℃。

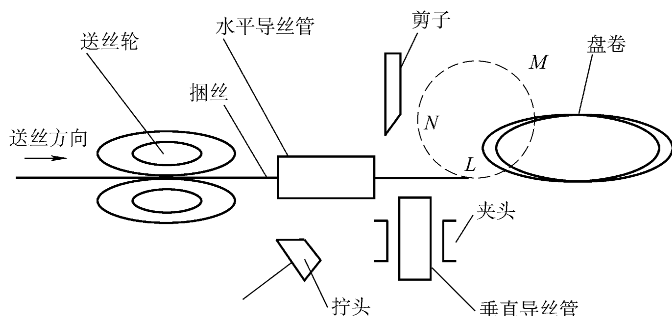



图 5-12　打捆机工作原理图

打捆机的工作主要由各机构协调动作完成，其中：送丝机构由一对导丝轮组成，它对捆丝有校直作用，其正向转动时，可送入捆丝；反向转动时，可将捆丝抽紧。导丝机构中最重要的部件为转臂机构，它是一个在内环面开有异型槽并可转动的导丝臂，其作用是引导 3mm 左右的冷捆丝，穿过待打捆的盘卷中央，环绕盘卷的横断面，进入垂直导丝管（捆丝头最后被转向 270°），呈交叉打结状；抽丝时，环状捆丝将从转臂机构的导槽中被抽出。拧头有前进、后退、转动三种运动状态。当其前进到位时，可卡紧捆丝结头；转动时，可将交叉的两根捆丝拧成麻花结，从而实现对盘卷的捆扎。

### 5.5.2　高温线材打捆机系统的组成

高温线材打捆机系统含机械、液压、电气三个子系统。其中，机械系统由整形机和打捆机组成。液压系统有两套液压站，分别给整形机和打捆机供油。

机械系统中，整形机的作用是对刚从吐丝机轧制出的盘卷进行“整形”，使其规整。打捆机的作用，就是用冷捆丝对仍处于高温状态的盘卷进行打结、捆扎，使其便于运输。两台打捆机分别位于传送盘卷的链式传送带的两边，同步地对同一盘卷的两侧各打一个结。打捆机的外形及组成如图 5-13 所示。

打捆机主要由送丝、导丝、夹紧、剪切、拧丝等机构组成，它们分别由液压缸或

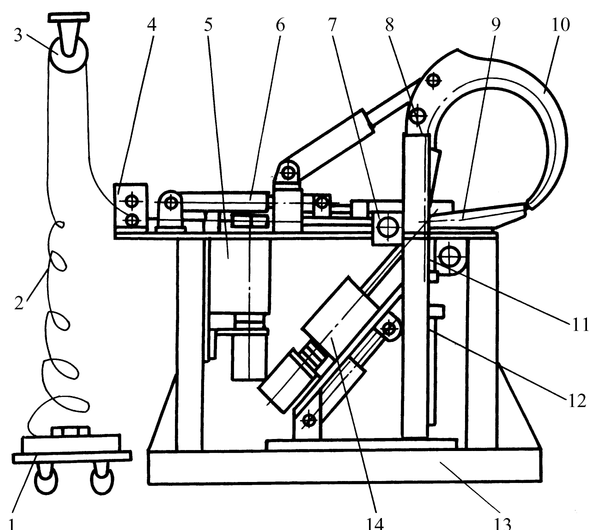



图 5-13　打捆机样机结构示意图

1—捆丝小车　2—捆丝　3—天轮　4—导向轮　5—送丝机构　6—水平送管机构
7—剪切机构　8—垂直臂　9—水平臂　10—转臂机构　11—夹紧机构
12—垂直送管机构　13—机架　14—拧丝机构

液压马达驱动（除剪切机机构外）。

## 5.5.3　打捆机系统的控制系统

打捆机的机械系统和液压系统是受电气自动控制系统控制的。作为整个系统的控制设备，它必须提供先进的控制手段。电气控制系统的技术要求涉及：

1）实时性。响应速度要快，以适应控制打捆机、整形机的需要。

2）灵活性。具有多种控制方式；控制流程更改方便、快捷；现场控制操作方便。

3）可靠性。抗干扰性能好，能适应生产现场比较恶劣的环境。

这些技术要求，是靠系统的电气设备与 PLC 的软、硬件系统结合实现的。

电气控制系统由电动机控制柜、PLC 控制柜、打捆机控制流程显示屏、现场操作台组成。在 PLC 柜中，使用了一台 120 点的 F1 系列 PLC，其输入/输出为 72/48 点，它是通过控制电磁阀，去控制液压缸（或油压马达），进而实现对打捆机和整形机的控制。

F1 系列 PLC 的指令系统的功能是比较强的，除基本指令外，还提供若干条功能指令，采用语句表方式编程。

## 5.5.4　PLC 应用程序的研制

打捆机系统控制程序的设计，是电气自动控制系统研制的重要环节。PLC 控制程

序的编制质量如何，对整个打捆机系统影响极大，并在很大程度上决定了该系统的运行效率和各项性能指标的最终实现。

在打捆机样机结构试验及样机试验阶段中，用 PLC 作控制器，进行了多次试验，从中总结出了合适的工艺流程，也摸索出适合于打捆机系统控制的编程方式。试验表明：打捆机系统的控制设计成顺序控制是可行的；采用 PLC 提供的步进指令来实现打捆机系统控制，编程方便，能有效解决 PLC 程序设计中一般不允许出现的“相同地址输出线圈重复使用”问题，编制的程序可靠性高；采用主控指令满足打捆机系统对多种工作方式的选择。

根据电气自动控制系统的技术要求，结合上述实验情况，并考虑到生产现场可能出现的情况，使用 F1 系列 PLC，用语句表编制出了控制程序。程序中，对打捆机、整形机中每台设备，均设有“半自动”、“自动复位”、“少点动”等控制方式，可在电控柜或现场操作台上进行选择。

其中，“自动复位”方式用于控制打捆机的各个机构自动恢复到初始状态，为进入“半自动”工作方式作好准备。“点动”方式用于设备检修，“半自动”方式用于控制打捆机完成一个周期内的全部动作，实现对盘卷捆扎 1 次。另外，在调试过程中曾使用过“步进方式”，可使打捆机暂停在其动作进程的任何一步上，这就为观察各机构状态、查找故障原因提供了极大的方便。

高温盘卷随链式传送带移动。当工作时，控制挡板将其挡住；打捆完毕，控制挡板退开，已捆扎的盘卷又继续前进。

## 5.5.5 高温线材打捆机的特点

1）机械设计中采用了部件化的组合式结构。机械设计中，借鉴了引进设备的优点，如深槽式送丝闭合导路、自动供丝方法等，同时针对其组成部件多，立体交叉排列，位置紧凑，空间狭小，加工、装配、维修困难的特点，对样机采用了部件化的组合式结构，即按功能独立为相应的部件，装配、调试、总装，较大地降低了加工、装配精度和维修难度。

2）驱动方式采用液压传动。国内早期的棒材包装机采用机械传动方式，其结构复杂、机构庞大、故障点多、维修量大、现场布置也不方便。引进的包装机采用气动较多，虽反应灵敏、动作快，但要求气压稳定。液压传动方式传动平稳，调节方便，结构简单。

3）电气控制采用先进的 PLC 控制技术。过去，机械设备的电气控制系统一般都是采用继电-接触器系统。这种方式的优点是成本相对较低，但随着继电器、接触器的触点磨损程度增加，故障率会逐渐增高。另外，这种传统系统在实际应用中也多有不便，当要求控制功能变化时，一般都要更改控制线路接线才能实现，费工、费时、麻烦。高温线材打捆机的多个机械部件的协调动作复杂，采用常规的电气控制系统，难以达到目的。可编程序控制器 PLC 是一种新型的控制器，其功能强，且使用灵活，代表了控制技术的发展方向，应用于电气控制系统中效果良好。

## 5.6　圆柱电阻激光自动刻槽机

用激光替代机械刀具对电阻体刻螺线槽有两种方法：一是采用扫描偏转镜使聚焦光点在被刻物面上直线扫描，物面仅旋转，刻出螺线槽，即光点位移法；二是聚焦光点不动，被刻物面旋转兼位移，刻出螺旋线槽，即物面位移法。从实际使用中看，物面位移法刻槽稳定、可靠、易控制、操作方便，远远优于普通的机械砂轮片电阻刻槽机。

### 5.6.1　圆柱电阻激光自动刻槽机的工作原理

利用激光的高能量密度特性，在一定功率下与金属膜材料作用，瞬间汽化金属膜材料，刻出洁净的线条。圆柱电阻激光自动刻槽机的运行逻辑框图如图 5-14 所示。

圆柱电阻激光自动刻槽机的运行方式为：当电阻自动装夹上后，位移到设定的起刻点时，由光电耦合产生一个信号，输送到逻辑控制电路，逻辑电路发出一个信号给声光驱动电源，声光开关打开，输出 1 ~ 20 kHz 的调 Q 激光，进行刻槽，同时阻值控制仪开始监测被刻电阻的阻值，当阻值达到预设值时，逻辑控制电路再发一个信号给声光驱动电源，关闭激光，电阻受控自动落入正品或废品盒。

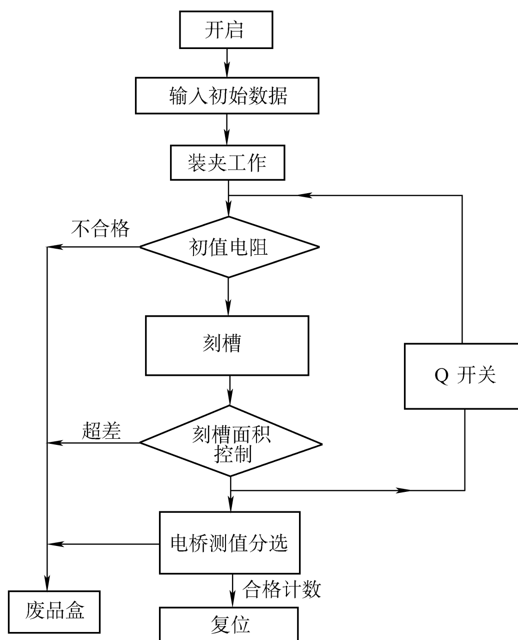



图 5-14　运行逻辑框图

### 5.6.2　圆柱电阻激光自动刻槽机的结构

圆柱电阻激光自动刻槽机是自动加工设备，主要由激光系统、自动机械系统、微机测控系统等几个部分组成。

**1. 激光系统**

借鉴国内外同类设备所采用激光器原理，经预实验分析，金属膜电阻材料对 1.06μm 波长的光吸收较好，而其氧化铝基质难于吸收 YAG 激光，采用波长为 1.06μm 的连续 YAG 中小功率激光器能满足使用要求。

激光光路如图 5-15 所示。激光采用双椭圆聚光腔，双氪灯泵浦，腔体、灯、棒和调 Q 晶体均由双循致冷水冷装置进行冷却。模式以基模 $TEM_{00}$ 为主成分的低阶模，光斑直径小于 0.05 mm。

YAG 激光腔总长 500mm，前模片对 1.06μm 的光透过率为 10%，后膜片对 1.06μm

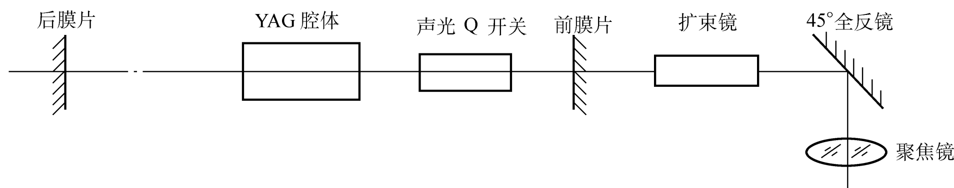



图 5-15　激光光路示意图

的光高反射达 99.8% 以上，调 Q 元件为声光 Q 开关，其声频为 40 MHz，输出频率 1 ~ 10kHz，脉宽 200ns 短脉冲激光。

输出的激光束经扩束镜可以有效改善光束发散度，再采用短焦距、长工作距、大孔径物镜聚焦成 0.05mm 以下的光斑，光学系统设置了精度为 0.01mm 的多维调节架，光点对焦调节极其方便。

**2. 自动机械系统**

机械系统是动作执行机构，要求精度高。该系统包括自动送料装置、物面自转兼位移装置、正废品分选装置、排尘装置、光点微调定位装置。

被刻电阻为圆柱体，可采用电磁振动自动定向连续上料，物面位移法刻槽使得电阻体必须自转兼位移。为使不同阻值的坯阻都能刻出光滑、均匀、无齿边的螺旋线槽，刻槽时光斑必须重叠 50% 以上，最高刻槽速度为 120 只/min，激光经调 Q 聚焦成 0.05mm 以下，频率为 1 ~ 20kHz 的微小光斑，以短脉冲形式与电阻膜作用。综合这些因素，该机选用两台反应式步进电动机分别驱动电阻的自转和位移。步距角为 1.5°/step、空载运行频率 8000 step/s 驱动自转，步距角 0.75°/step。在转矩允许的情况下步距角越小，运行频率越高，电动机振动越小时，对刻槽条纹的质量影响越小。该机的转动通过同步齿形带轮传递给左、右两根主轴。与机械刀片刻槽不同，受激光聚焦光斑焦深的限制，左、右两主轴的同轴度及跳动是保证刻线质量的关键，该机设计有高精度的圆柱导轨，支撑左右两主轴位移，通过偏心轴套可方便地调整左、右主轴的同轴度，将电阻径向圆跳动控制在 0.02mm 以内。

电阻位移凸轮采用圆柱端面凸轮，位移可靠，易控制，对应电阻体上启刻点，正、废品判断点均由专门设计的光电凹轮控制。

在激光加工机械中，防振是很重要的。振动会使腔的准直性破坏，输出功率下降，槽纹扭曲。为了避免振动，激光器和机械系统设计成分离式，电动机安装采用了隔振弹簧，振动送料装置独立安置，步进电动机尽可能选用小步距角，并采用细分电路。

整机经试刻，刻槽线条均匀、细致、光滑，达到进口机的水平。

**3. 微机测控系统**

微机测控系统是整台机器的“大脑”，它包括整机电源、电桥及其放大电路、光电信号产生电路、逻辑控制电路、执行电路、自动落料控制电路及步进电动机驱动和信号生成电路。

电桥及放大电路以微调比例臂比值的办法进行在线测量控制结果的微调。

光电信号产生电路，物面位移法刻槽可采用和位移凸轮同轴运转的信号板（光电

凹轮）来控制光电耦合器光信号的通断，以产生与电路各关键部位相对应的光电信号，作为逻辑控制的输入信号。

逻辑控制电路和逻辑动作执行电路主要是控制信号输入及信号来到时能及时断关激光。另外，在连续出现若干废品或产生故障时，能声光报警，关断激光并切断电动机电源。

落料控制电路主要用于控制自动送料的速度。

## 5.7　自动旋转门

自动旋转门是楼宇设备中的光机电一体化技术产品，其最大优点在于它“永远开门，又永远关门”，即对于人来说，门总可以打开，可对于建筑物来说，门又总是关着。因此，自动旋转门在保安功能方面具有独到的特性，且其动态密封效果在经常使用的条件下相对其他自动门要好。由于自动旋转门的人流量有限，通常在自动旋转门两侧另设自动或手动平开门，一方面增加通行能力，另一方面当自动旋转门出现故障时，不影响人的通过。但在静态密封效果方面，自动旋转门远不如其他自动门，因为其门体运动方式决定着只能使用毛条密封。

### 5.7.1　自动旋转门的主要类型

**1. 自稳定性自动旋转门**（三翼和四翼旋转门）

三翼和四翼旋转门（见图 5-16）的中心门轴通过轴承机构垂直安装于地面，门翼呈发散式固定在中心门轴上，各门扇之间的角度相等。中心门轴的上方安装电动机及其他电气控制部件，再配以感应装置和安全装置，就成为自动旋转门。这种结构的稳定性好，使用的可靠性很高，使用寿命长。考虑到旋转门在停止时一定要密封，所以三翼旋转门的每个分隔可以容纳更多的人，可是门的净开口宽度较小。而四翼旋转门的每个分隔可以容纳较少的人，但门的净开口宽度较大。

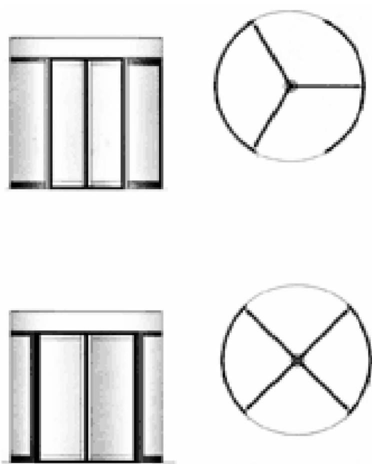


图 5-16　三翼和四翼旋转门示意图

**2. 悬挂式自动旋转门**（两翼旋转门）

为扩大旋转门人员流量，扩大旋转门门扇之间的距离，可以将旋转门的门扇数量减为两个。但是，两翼旋转门已不可能再采用原有的中心门轴结构，因为两个门扇使中心驱动的力矩过大，而驱动力的作用力点又很少。另外，中心门轴结构难以实现两翼旋转门的紧急打开功能。于是两翼旋转门采用了上部圆周导轨悬挂整个门体的设计，以一个或两个电动机驱动。控制部分与稳定性自动旋转门相同。值得一提的是，两翼旋转门的紧急打开功能从结构上变得很容易，即在中间设置一个自动平移门或手动平开门。两翼旋转门的停门位置有两个，一个是门体与入口平面平行，中间的自动平移

门或手动平开门可直接使用；另一个是门体与入口平面垂直，门体两端的圆弧将旋转门的两个开口同时封住，在冬季可获得好的密封隔热效果，如图 5-17 所示。



图 5-17　框架玻璃装饰的两翼自动旋转门

## 5.7.2　自动旋转门系统的结构特点和工作原理

图 5-18 所示为一可环绕固定立柱安装和旋转的三翼自动旋转门，自动旋转门本体分为外壳部分 2 和内部结构部分 4 ~ 9。内部结构主要是起旋转支撑作用的定心导向圈 6 和定心导向圈固定座 7，其中定心导向圈固定座 7 又与立柱 5 牢固连接，它们之间又连接成完整的圆环体，从而附着固定于立柱 5 上，成为旋转运动部件定心和导向的可靠约束。此圆环体的另一个作用是用来安装旋转门的驱动变速驱动装置 8，驱动变速驱动装置 8 主要由交流电动机和输出轴带驱动小齿轮的摆线针轮减数器构成，用来驱动固定在旋转部分 4 上的大齿圈 9，旋转部分 4 的主体部分是一个有足够强度和刚度，重量又较轻的薄壁圆柱形网筒，借大齿圈的转动可以绕立柱体 3 的轴线旋转，圆柱形网筒上按等分角度固定安装了规定数目的旋转门扇 2（一般为 2 ~ 4 扇）随筒旋转，就形成了旋转门装置。

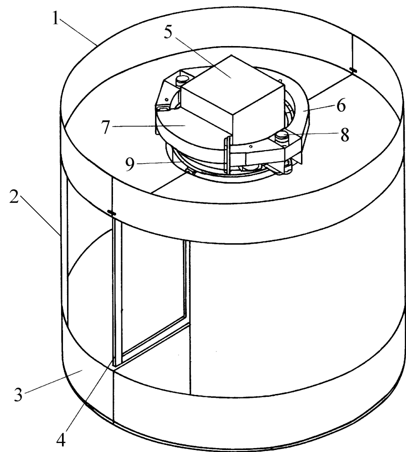



图 5-18　三翼环柱式自动旋转门

1—华盖　2—外壳部分　3—外壳底边　4—旋转部分　5—固定立柱　6—定心导向圈　7—定心导向圈固定座　8—变速驱动装置　9—对开大齿圈

另一方面，对环柱式旋转门的控制功能的要求和安全并未因其制作难度的增加而有所降低，相反，由于环柱式旋转门的旋

转质量远大于普通旋转门的旋转质量，使得对环柱式旋转门运动的精确定位控制带来了困难，这导致一般不能简单地将普通旋转门的控制系统移到环柱旋转门上。

### 5.7.3 自动旋转门的主要控制功能

目前普遍采用的旋转门控制和安全功能主要有以下几项：

1）自动启停功能。由接近传感器通知系统是否有移动物体接近或进入，以启动旋转门以常速（4 r/min）自动旋转，或停止旋转门运行。

2）自动定位停功能。自动在锁门位置和密封位置停止。

3）防夹功能。在右边曲壁立柱（即由外入内）侧，安装了红外式防夹开关装置，以防止门扇与曲壁立柱夹伤行人及宠物等。

4）防碰功能。旋转门驱动电动机与电流检测传感器相连，当行人碰到门时会导致电动机电流的变化，传感器会将这一变化检测出来，防止门扇碰伤行人。

5）残疾人调速功能。自动转门设置有残疾人按钮，当残疾人通过时，按下该按钮，转门可以低速1~2r/min转动，待残疾人顺利通过后，转门自动恢复常速。

6）紧急按钮。自动转门设有紧急停止按钮，遇有特殊情况发生，需要转门停止旋转时，可按下此按钮。

7）紧急疏散通道。当出现紧急情况时（如火警），门扇可折叠打开，形成畅通无阻通道，符合消防安全需要。

8）调速功能。常速为4 r/min；慢速为2 r/min；快速为6 r/min。

9）夜间闭锁功能。夜间开启电子锁锁定转门，具有保安作用。

10）自动报警功能。当门玻璃遭到破坏时，可自动报警，便于有关方面对事故进行处理，并具有保安作用。

### 5.7.4 环柱式自动旋转门的驱动控制系统设计

根据对自动旋转门上述工作和安全能力的基本要求，制定出以下的功能和性能参数作为控制系统的设计依据。

（1）旋转门的功能特点

1）变速功能。旋转门设有低速、中速和高速3种旋转速度，分别对应残疾、middle和high三个按钮进行切换，以适应残疾人通过、正常运转和紧急疏散对转速的不同要求。

2）自动转停功能。来人时自动启动，并以正常转速运转，15s无人进出，则自动停转并封门。

3）防夹功能。当门扇运转靠近曲壁立柱时，如果行人试图从两者之间（防夹区）进入旋转门，则门立即自动停转以防夹伤行人。行人离开防夹区，门自动恢复运转。

4）防撞功能。当行人紧靠右侧立柱或遇物体碰撞右侧立柱时，则旋转门马上停转，以防止撞伤行人或撞坏物体。行人或物体离开右侧立柱，门自动恢复运转。

5）防碰功能。行人在旋转门内通行过程中，如遇门扇碰行人脚后跟，则门立即自动停转，以防止碰伤行人。行人离开门扇，门自动恢复运转。

6）锁门功能。采用电磁锁方式锁门，只要转动锁匙即可完成自动锁门工作，快捷方便。

7）急停功能。当出现紧急意外事故时，按下急停按钮，门立即停转；解除急停信号，门又自动恢复运转。

8）暂停功能（STOP 钮）。与急停功能相当，不同的是按 STOP 钮后，必须用残疾、middle 或 high 三个按钮中的一个进行恢复。

9）残疾优先功能。当按下残疾按钮后，30s 内门始终以 2r/min 的速度低速运转，此时按 middle 钮或 high 钮无效，以确保残疾人安全通过。30s 后来人，门自动以正常速度运转。

10）电动机过载保护功能。当电动机过载时，门停转并且指示灯闪烁报警。过载消除后门自动恢复运转。

（2）旋转门的主要性能参数

1）电动机。交流电动机两台，每台功率为 750W。

2）门转速。门转速分为低速（2r/min），中速（4r/min）和高速（6r/min）。

（3）旋转门电动机系统驱动控制原理

1）电气控制系统接线方案。旋转门采用 Y 型三相交流异步电动机驱动，日立 SJ100 变频器进行变频调速，以适应不同转速的需要。电气控制系统接线图如图 5-19 所示。电动机转速通过 SJ100 智能端子 3、4 电平高低组成的速度控制字进行设定，速度设定单元为变频器的 A20、A21、A22、A23 四个单元，其设定值（频率）见表 5-2，其中 A23 为直流制动前频率。

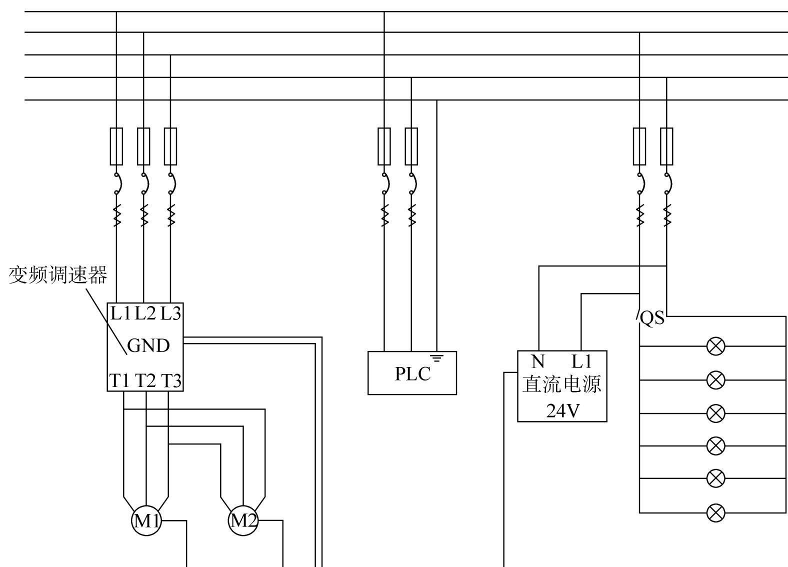



图 5-19　旋转门电气系统接线图

表 5-2　电动机转速设定表

| 速度控制字 | 智能端子电平高低 | | 速度设定单元 | 速度设定值/Hz | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 端子 4 | 端子 3 | | | |
| 00 | 0 | 0 | A20 | 50 | 高速 |
| 01 | 0 | 1 | A21 | 33.3 | 中速 |
| 10 | 1 | 0 | A22 | 16.7 | 低速 |
| 11 | 1 | 1 | A23 | 10 | 制动前速度 |

2）传感器设置方案。选用的各种类型传感器及其安装位置如图 5-20 所示。红外线被动式感应器 1 安装于旋转门的进口和出口华盖上，每处各安装两个红外线感应器，感应行人进入门体，门扇马上以正常速度旋转。红外线防夹安全感应器 2 防止门扇与曲壁柱之间夹伤行人，当门扇接近曲壁立柱时，感应器 2 与接近开关 1 信号同时生效，门扇马上停止。防撞胶条安装于入口右侧门立柱上，胶条内装有内藏式感应器 3，如遇物体碰撞或受压，门扇马上停止转动，防止夹伤行人，胶条内感应器 3 恢复正常后，转门也随之恢复正常运转。每扇门扉底边装有全开宽内藏式感应器 4，如碰到物体或受压，门扇马上停止转动，防止门扇打倒行人，胶条内感应器 4 恢复正常后，转门也随之恢复正常运转。此外，还采用了 4 只测量范围为 5 mm 的电感式接近开关，如图 5-21 所示。接近开关用于防夹位置区域设定、直流制动封门及锁门定位。

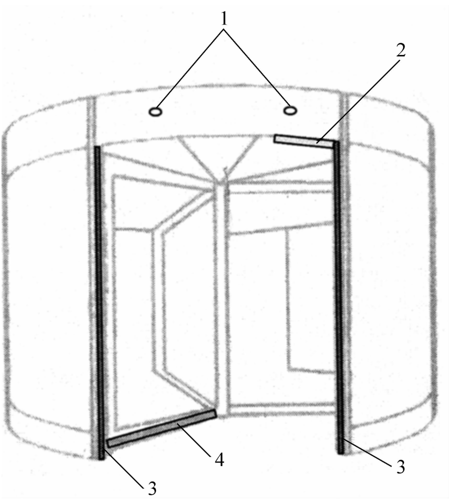



图 5-20　各种传感器的安装位置
1—动作感应器　2—红外线防夹安全感应器
3—防撞感应器　4—防碰感应器

3）PLC 控制系统设计。旋转门控制系统的中央处理器采用 SIEMENS 公司的 PLC，通过与其他电气部件的连接（见图 5-22）和执行所编写的控制程序，可以实现旋转门系统全部控制功能。表 5-3 和表 5-4 列出了 PLC 控制信号清单。

表 5-3　输入点信号表

| 输入点 | 信号内容 | 输入点 | 信号内容 | 输入点 | 信号内容 |
|---|---|---|---|---|---|
| I0.0 | 急停 | I1.0 | 红外感应器 1 | I2.0 | 红外感应器 3 |
| I0.1 | 残疾开关 | I1.1 | 防撞传感器 1 | I2.1 | 红外感应器 4 |
| I0.2 | STOP 开关 | I1.2 | 防碰传感器 1 | I2.2 | 防撞传感器 2 |
| I0.3 | Middle 开关 | I1.3 | 防夹传感器 1 | I2.3 | 防碰传感器 2 |
| I0.4 | High 开关 | I1.4 | 变频器报警输出 | I2.4 | 防碰传感器 3 |
| I0.5 | 锁匙 | I1.5 | 锁门接近开关 | I2.5 | 防夹传感器 2 |

（续）

| 输入点 | 信号内容 | 输入点 | 信号内容 | 输入点 | 信号内容 |
|---|---|---|---|---|---|
| I0.6 | 直流制动接近开关 | I1.6 | 防夹接近开关 2 | I2.6 | |
| I0.7 | 防夹接近开关 1 | I1.7 | 红外感应器 2 | I2.7 | |

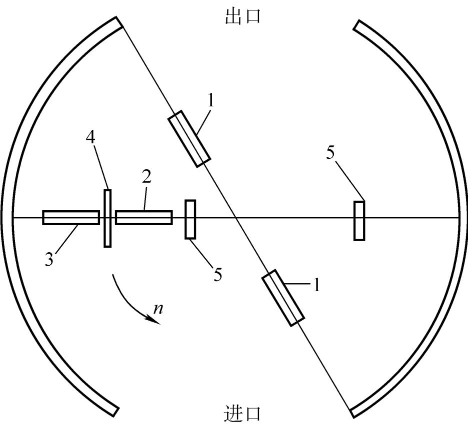



图 5-21　接近开关安装位置示意图

1—防夹接近开关　2—直流制动接近开关　3—锁门接近开关

4—锁门开关感应片　5—防夹、直流制动开关感应片

**表 5-4　输出点信号表**

| 输出点 | 信 号 内 容 |
|---|---|
| Q0.0 | 上电及报警指示灯 |
| Q0.1 | 电磁锁控制继电器 |
| Q0.2 | 电动机启停（变频器智能端子 1） |
| Q0.3 | 速度控制（变频器智能端子 3） |
| Q0.4 | 速度控制（变频器智能端子 4） |
| Q0.5 | |
| Q0.6 | 直流制动（变频器智能端子 5） |
| Q0.7 | 变频器复位（变频器智能端子 6） |

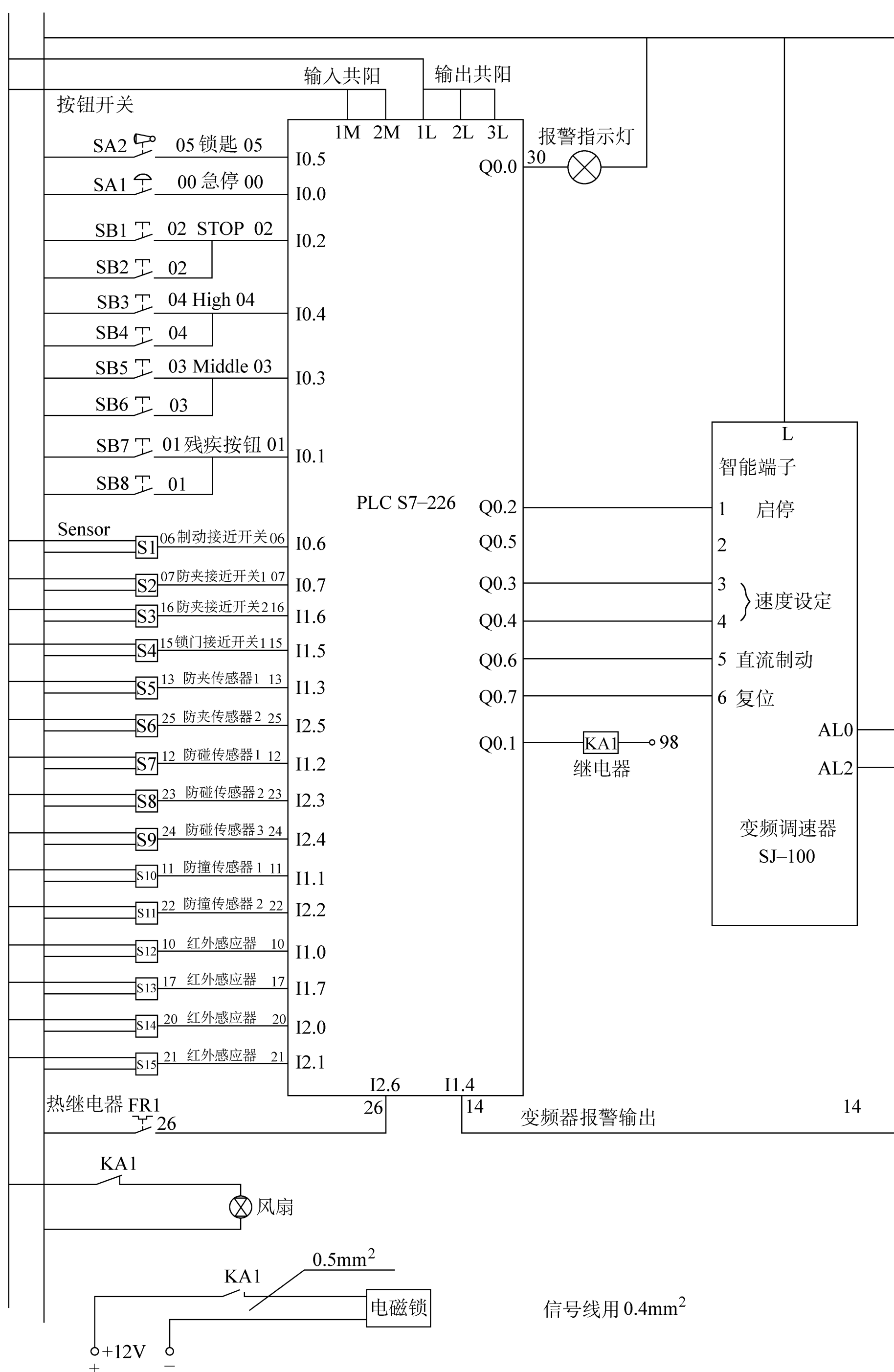



图 5-22　旋转门控制系统接线图

# 第 6 章　在交通方面的应用

## 6.1　汽车 ABS 系统

随着世界汽车工业的迅猛发展，安全性日益成为人们选购汽车的重要依据。目前广泛采用的防抱制动系统（Autolock Braking System，ABS）是在制动过程中，自动调节车轮制动力，防止车轮抱死以取得最佳制动效能的电子装置。它是提高汽车被动安全性的一个重要装置。由于汽车制动过程具有明显的非线性、时变性和不确定性等特点，如图 6-1 所示的汽车 ABS 系统是目前世界上普遍公认的提高汽车制动安全性的有效措施之一。

与常规的液压制动系统相比，ABS 系统具有下列优点：

1）增加了汽车制动时的稳定性。汽车在制动时，如果前轮先抱死，驾驶员将无法控制汽车的行驶方向，这是非常危险的；倘若后轮先抱死，则会出现侧滑、甩尾，甚至使汽车整个调头等严重事故。ABS 系统可以防止车轮制动时被完全抱死，提高了汽车行驶的稳定性。资料表明，装有 ABS 系统的车辆，可使因车轮侧滑引起的事故比例下降 8% 左右。

2）缩短制动距离。在同样紧急制动的情况下，ABS 系统可以将滑移率控制在 20% 左右，从而可获得最大的纵向制动力。但当汽车在积雪路面上制动时，若车轮抱死，则车轮前的楔状积雪可阻止汽车的前进。在此条件下，装有 ABS 系统的汽车，其制动距离可能更长。

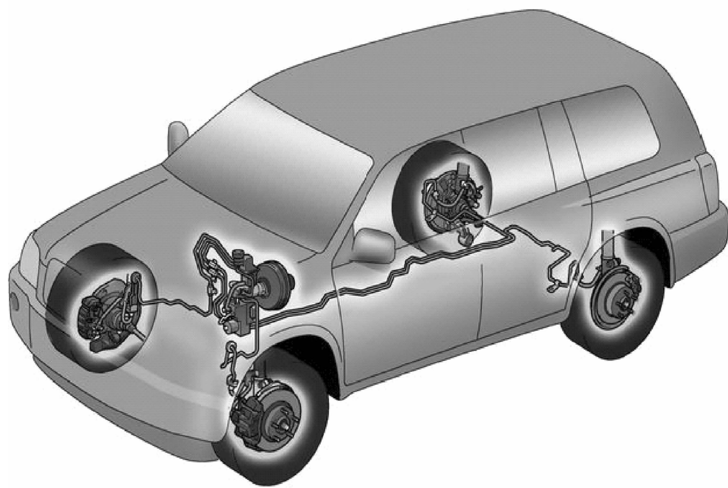


图 6-1　汽车 ABS 系统

3）改善了轮胎的磨损状况。使用 ABS 防止车轮抱死，消除了在紧急制动过程中轮胎平斑的可能性。车轮抱死会加剧轮胎磨损，而且轮胎胎面磨耗不均匀，使轮胎磨损消耗费增加。经测定，汽车在紧急制动时，车轮抱死所造成的轮胎累加磨损费，已超过一套防抱死制动系统的造价。因此，装用 ABS 系统具有一定的经济效益。

4）使用方便，工作可靠。ABS 系统的使用与普通制动系统的使用几乎没有区别，制动时只要把脚踏在制动踏板上，ABS 系统就会根据情况自动进入工作状态，如遇雨雪路滑，驾驶员也没有必要用一连串的点制动方式进行制动，ABS 系统会使制动状态保持在最佳点。此即 ABS 制动过程中的保压状态。

## 6.1.1　汽车 ABS 系统的工作原理

汽车 ABS 系统的工作原理是，依靠装在车轮上的转速传感器及车身上的车速传感器，通过计算机对制动力进行控制。紧急制动时，一旦发现某个车轮抱死，计算机立即指令压力调节器对该轮的制动分泵减压，使车轮恢复转动。

在驾驶员、汽车和环境三者所组成的闭环系统中，汽车与环境之间最基本的联系是轮胎与路面之间的作用力。由于汽车行驶状态主要是由轮胎与路面之间的纵向作用力与横向作用力决定的，因此车轮与路面之间的作用力必然要受到轮胎与路面之间附着力的限制。ABS 系统可最大限度地利用轮胎与路面的纵向和横向附着系数，从而在制动过程中增强汽车的稳定性，防止侧滑和摆尾，同时在紧急制动过程中保持转向操纵能力，有效利用纵向附着力可以缩短汽车制动距离，同时也使轮胎的磨损大为减轻。

汽车制动时由于车轮速度与汽车速度之间存在着差异，因而会导致车轮与路面之间产生滑移。从图 6-2 所示的道路附着系数与车轮滑移率关系曲线可以看出：当车轮以纯滚动方式与路面接触时，其滑移率为零；当车轮速度为汽车速度的 80% 时，即车轮滑移率为 20% 左右时，车轮处于连滚带滑状态，此时车轮具有最大的纵向附着力和较高的侧向附着力；当车轮抱死并转速为零时，即车轮滑移率为 100% 时，其侧向附着力就变得很小，只要存在很小的侧向力干扰，如侧风、制动力不均匀、路面倾斜等，汽车便产生侧滑。研究表明：当滑移率在 8% ~ 35% 之间时，能传递最大的制动力。制动防抱死的基本原理就是依据上述的研究成果，通过控制调节制动力，使制动过程中，车轮滑移率控制在合适的范围内，以取得最佳的制动效果。

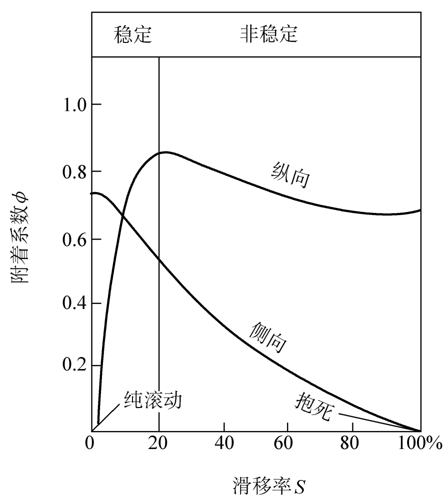



图 6-2　附着系数与滑移率曲线

## 6.1.2　汽车 ABS 系统的工作过程

汽车 ABS 系统的工作过程可以分为常规制动、制动压力减小和制动压力增大等阶

段。在常规制动阶段，汽车 ABS 系统并不介入制动压力控制，调压电磁阀总成中的各进液电磁阀均不通电而处于开启状态，各出液电磁阀均不通电而处于关闭状态，电动泵也不通电运转，制动主缸至各制动轮缸的制动管路均处于沟通状态，而各制动轮缸至储液器的制动管路均处于封闭状态，各制动轮缸的制动压力将随制动主缸的输出压力而变化，此时的制动过程与常规制动系统的制动过程完全相同。

汽车 ABS 系统的工作过程实际上是抱死 - 松开 - 抱死 - 松开的循环工作过程，车辆始终处于临界抱死的间歇滚动状态，可以有效克服紧急制动时的跑偏、侧滑、甩尾等情况，防止车身失控。在制动过程中，电子控制装置根据车轮转速传感器输入的车轮转速信号判定有车轮趋于抱死时，汽车 ABS 系统就进入防抱制动压力调节过程。汽车 ABS 系统通过使趋于抱死车轮的制动压力循环往复而将趋于防抱车轮的滑动率控制，在峰值附着系数滑动率的附近范围内，直至汽车速度减小至很低或者制动主缸的输出压力不再使车轮趋于抱死时为止。制动压力调节循环的频率可达 3 ~ 20Hz。在该汽车 ABS 系统中对应于每个制动轮缸各有对进液和出液电磁阀，可由电子控制装置分别进行控制，因此，各制动轮缸的制动压力能够被独立地调节，从而使四个车轮都不发生制动抱死现象。

### 6.1.3　汽车 ABS 系统的组成

通常，汽车 ABS 系统是在普通制动系统的基础上加装车轮速度传感器、ABS 电控单元、制动压力调节装置及制动控制电路等组成的，如图 6-3 所示。

在制动过程中，ABS 电控单元 3 不断地从传感器 1 和 5 获取车轮速度信号，并加以处理，分析是否有车轮即将抱死拖滑。如果没有车轮即将抱死拖滑，制动压力调节装置 2 不参与工作，制动主缸 7 和各制动轮缸 9 相通，制动轮缸中的压力继续增大，此即汽车 ABS 系统制动过程中的增压状态。

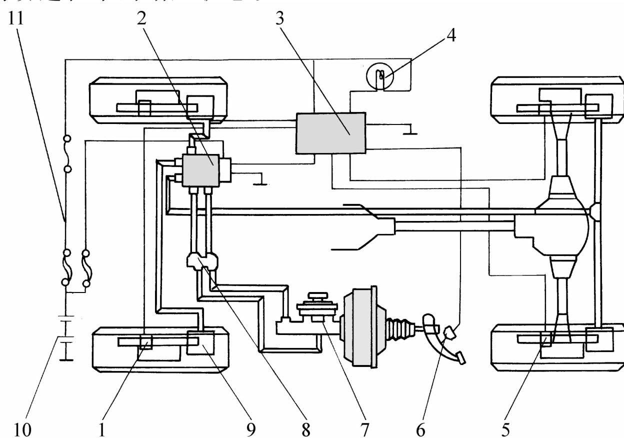



图 6-3　汽车 ABS 系统的组成（分置式）

1—前轮速度传感器　2—制动压力调节装置　3—ABS 电控单元　4—ABS 警告灯
5—后轮速度传感器　6—停车灯开关　7—制动主缸　8—比例分配阀
9—制动轮缸　10—蓄电池　11—点火开关

如果电控单元判断出某个车轮（假设为左前轮）即将抱死拖滑，它即向制动压力调节装置发出命令，关闭制动主缸与左前制动轮缸的通道，使左前制动轮缸的压力不再增大，此即汽车 ABS 系统制动过程中的保压状态。

## 1. 车轮转速传感器

如图 6-4 所示的转速传感器的功用是检测车轮的速度，并将速度信号输入 ABS 的中央电控单元 ECU。其安装位置如图 6-5 所示。目前，用于 ABS 系统的常用车轮转速传感器有电磁感应式和霍尔式两种。

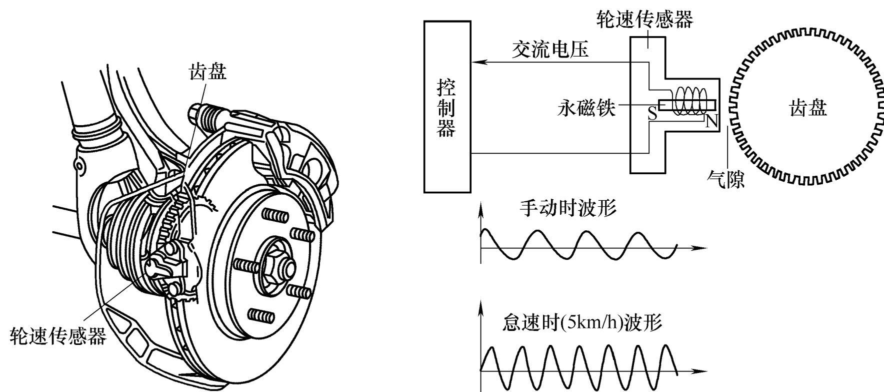



图 6-4　车轮转速传感器

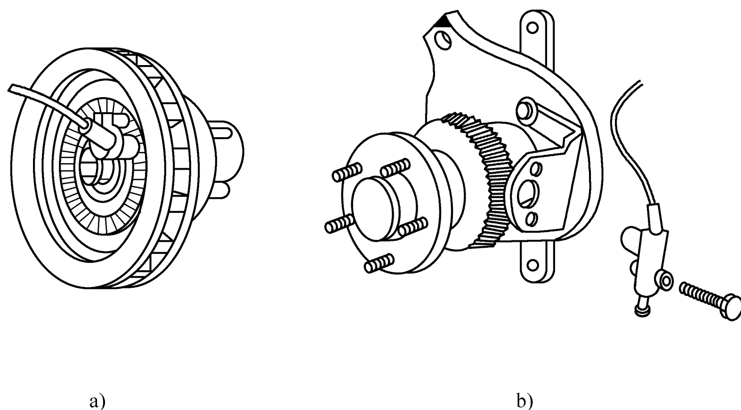



图 6-5　车轮转速传感器在传动系统中的安装位置
a）前轮　b）后轮

（1）电磁感应式车轮转速传感器　它是通过线圈的磁通变化，感应出脉冲电压信号的装置。电磁感应式车轮转速传感器由磁感应传感头和齿圈两部分组成。传感头为静止部件，由永久磁铁、感应线圈和磁极（极轴）构成，安装在每个车轮的托架上，有两根引线（屏蔽线）接至电控单元。齿圈为运动部件，安装在轮毂或轮轴上，和车轮一起旋转。其齿数的多少与车型及电控单元有关，不同车型的 ABS 装置不通用。

根据极轴的结构形式不同，电磁感应式转速传感器又分为凿式和柱式等。

（2）霍尔式车轮转速传感器　霍尔式车轮转速传感器由传感头和齿圈两部分构成。传感头由永磁体、霍尔元件和电子电路等组成。霍尔式车轮转速传感器工作原理如图 6-6 所示。图 6-6a 中穿过霍尔元件的磁力线分散，磁场较弱；图 6-6b 中则相反，磁场较强。这样齿圈随车轮转动时，使得穿过霍尔元件的磁力线密度发生变化，从而产生霍尔电压（毫伏级准正弦波电压），此电压信号再由电子电路转换成标准的脉冲电压信号输入电控单元。

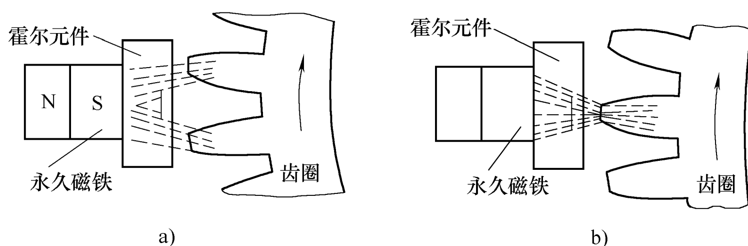



图 6-6　霍尔式车轮转速传感器工作原理示意图

a）霍尔元件磁场较弱　b）霍尔元件磁场较强

**2. 制动压力调节装置**

制动压力调节装置的作用是根据 ECU 的指令，调节各个车轮制动器的制动压力。常用制动系统有液压式、机械式、气压式和空气液压复合式等。

（1）液压循环式制动压力调节器　主要由一只电动泵、储能器、八个电磁阀等构成一个整体。八个电磁阀分别控制通往前后轮的四个管路的油压，每个管路中一对电磁阀中的一个是常开进油阀，另一个是常闭出油阀。八个电磁阀的开闭由电控单元控制。电动泵两端的进出油路上分别设置有一个吸入阀和压力阀。储能器和电动泵并联，用以存储从制动工作缸流回的制动液，并减轻油压的脉动。

液压循环式制动压力调节器的压力调节可分为 4 个阶段：

1）制动油压建立（初始制动阶段）。

2）制动压力保持阶段。随着制动压力升高和车轮转速下降到一定程度，车轮开始出现部分滑移现象。当车轮的滑移率达到 10% ~20% 左右时，ABS 中的电控单元将输出控制信号给进油阀，使其通电而关闭油路，出油阀不通电仍处于关闭状态。此时，制动工作缸内油压将保持不变，即处于某一个稳定的油压状态下。

3）制动压力降低阶段。当制动油压保持不变而车轮转速继续下降，车轮的滑移率超过 10% ~20% 左右时，ABS 中的电控单元将输出控制信号给出油阀，使其通电而处于打开状态，进油阀继续通电而处于关闭状态，从而使制动工作缸内的高压油从出油阀经管路流入储能器中，制动工作缸内的制动油压下降，车轮转速由下降逐渐变为上升，滑移率也由增加逐渐变为下降。与此同时，ABS 中的电控单元还将输出控制信号给电动液压泵，使其工作，并把储能器和由出油阀流出的压力液压泵回制动主缸，以保证制动工作缸内的制动液压能迅速有效地下降。

4）制动压力增加阶段。前提条件是脚一直踏在制动踏板上，使其液压油路中形成液压。当车轮转速上升，滑移率下降到低于 10% ~20% 时，ABS 中的电控单元将输出

控制信号给进、出油阀，使其断电。此时，进油阀打开，出油阀关闭，制动主缸和制动工作缸油路接通，制动主缸的压力油进入制动工作缸，制动油压增加，车轮转速又开始下降。同时电动泵继续工作，以保证制动油压的增加更快速有效。如此交替控制进、出油阀的开闭（其变化频率约为 5 ~6 次/秒），使车轮的滑移率始终被控制在 10% ~20% 左右，从而使汽车的制动性能达到最佳状态。

**3. 中央电控单元（ECU）**

中央电控单元 ECU 由硬件和软件两部分组成。

硬件是安装在印制电路板上的各元器件及线路，软件则是固存在只读存储器中的一系列控制程序。

ABS ECU 是制动防抱死系统的控制中枢，ECU 的主要功能是把各车轮转速传感器传来的信号进行比较、分析和判别；再通过精确计算得出车轮制动时的滑移状况，形成相应的指令，控制制动液压力调节装置及其他装置（如副节气门、步进电动机等）对制动液压力进行调节；使进入制动分泵中的制动液以最合适的压力值来控制各车轮的转速，将滑移率控制在 10% ~25% 的范围内，以达到最佳制动效果。

ECU 控制系统如图 6-7 所示。

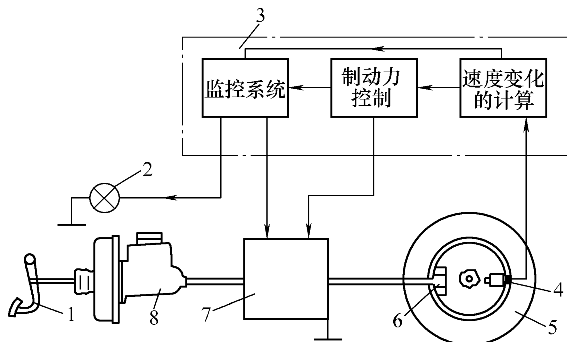



图 6-7　控制系统示意图

1—制动踏板　2—报警灯　3—ECU　4—车轮转速传感器　5—车轮
6—制动分泵　7—制动液压力调节装置　8—制动总泵

## 6.1.4　汽车 ABS 系统的分类

按组成结构的不同，汽车 ABS 系统可分为整体式和分体式。整体式 ABS 的制动主缸、液压调节器和各控制阀制成一体，有些无真空助力元件。分体式 ABS 的制动主缸和真空助力液压元件仍采用传统制动装置，制动主缸和调节器及各控制阀没有制成一体。

按制动力源的不同，ABS 可分为气压式、液压式和气顶液压式。

按控制回路的不同，ABS 可分为四种：四通道控制回路（配有四个传感器，四轮独立控制）；三通道控制回路（配有三个或四个传感器，两前轮单独控制，两后轮一起控制）；双通道控制回路（配有二至四个传感器，通常为两前轮一起控制，两后轮一起控制）；单通道控制回路（配有一个或两个传感器）。

**1. 四通道 ABS**

对应于双制动管路的 H 型（前后）或 X 型（对角）两种布置形式，四通道 ABS 也有两种布置形式，如图 6-8a、b 所示。

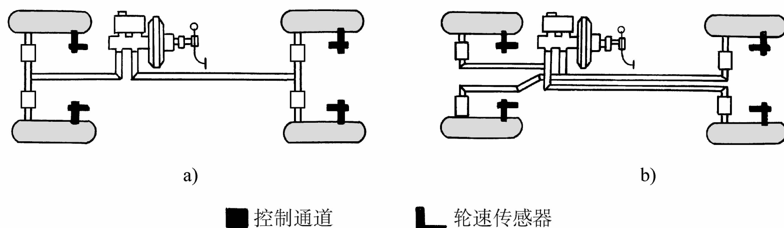



图 6-8　四通道 ABS 布置形式

为了对四个车轮的制动压力进行独立控制，在每个车轮上各安装一个转速传感器，并在通往各制动轮缸的制动管路中各设置一个制动压力调节分装置（通道）。

由于四通道 ABS 可以最大程度地利用每个车轮的附着力进行制动，因此汽车的制动效能最好。但在附着系数分离（两侧车轮的附着系数不相等如路面部分积水或结冰）的路面上制动时，由于同一轴上的制动力不相等，使得汽车产生较大的偏转力矩而产生制动跑偏。因此，ABS 通常不对四个车轮进行独立的制动压力调节。

**2. 三通道 ABS**

四轮 ABS 大多为三通道系统，而三通道系统都是对两前轮的制动压力进行单独控制，对两后轮的制动压力按低选原则一同控制，其布置形式如图 6-9 所示。

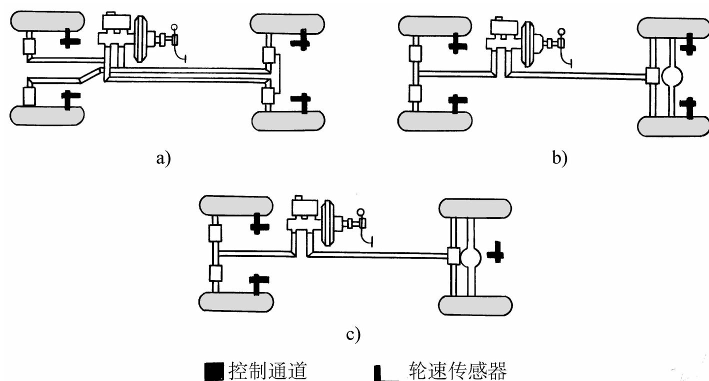



图 6-9　三通道 ABS 布置形式

图 6-9a 所示的按对角布置的双管路制动系统中，虽然在通往四个制动轮缸的制动管路中各设置一个制动压力调节分装置，但两个后制动压力调节分装置却是由电子控制装置一同控制的，实际上仍是三通道 ABS。由于三通道 ABS 对两后轮进行一同控制，对于后轮驱动的汽车可以在变速器或主减速器中只设置一个转速传感器来检测两后轮的平均转速。

汽车紧急制动时，会发生很大的轴荷转移（前轴荷增加，后轴荷减小），使得前轮的附着力比后轮的附着力大很多（前置前驱动汽车的前轮附着力约占汽车总附着力的

70% ~80%)。对前轮制动压力进行独立控制，可充分利用两前轮的附着力对汽车进行制动，有利于缩短制动距离，并且汽车的方向稳定性得到很大改善。

三通道 ABS 特点是汽车在各种条件下制动时都具有良好的方向稳定性。三通道 ABS 在小轿车上被普遍采用。

**3. 双通道 ABS**

图 6-10a 所示的双通道 ABS 在按前后布置的双管路制动系统的前后制动管路中各设置一个制动压力调节分装置，分别对两前轮和两后轮进行一同控制。两前轮可以根据附着条件进行高选和低选转换，两后轮则按低选原则一同控制。

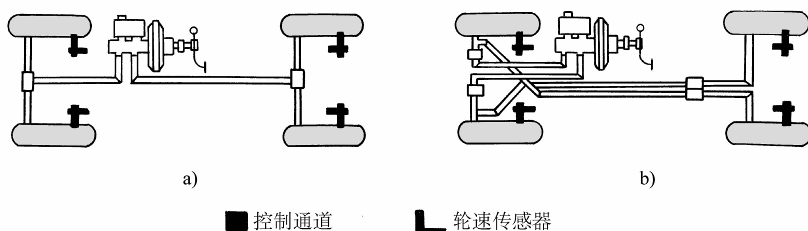



图 6-10　双通道 ABS 布置形式

对于后轮驱动的汽车，可以在两前轮和传动系中各安装一个转速传感器。当在附着系数分离的路面上进行紧急制动时，两前轮的制动力相差很大，为保持汽车的行驶方向，驾驶员会通过转动转向盘使前轮偏转，以求用转向轮产生的横向力与不平衡的制动力相抗衡，保持汽车行驶方向的稳定性。但是在两前轮从附着系数分离路面驶入附着系数均匀路面的瞬间，以前处于低附着系数路面而抱死的前轮的制动力因附着力突然增大而增大，由于驾驶员无法在瞬间将转向轮回正，转向轮上仍然存在的横向力将会使汽车向转向轮偏转方向行驶，这在高速行驶时是一种无法控制的危险状态。

图 6-10b 所示的双通道 ABS 多用于制动管路对角布置的汽车上，两前轮独立控制，制动液通过比例阀（P 阀）按一定比例减压后传给对角后轮。

对于采用此控制方式的前轮驱动汽车，如果在紧急制动时离合器没有及时分离，前轮在制动压力较小时就趋于抱死，而此时后轮的制动力还远未达到其附着力的水平，汽车的制动力会显著减小。而对于采用此控制方式的后轮驱动汽车，如果将比例阀调整到正常制动情况下前轮趋于抱死时，后轮的制动力接近其附着力，则紧急制动时由于离合器往往难以及时分离，导致后轮抱死，使汽车丧失方向稳定性。

由于双通道 ABS 难以在方向稳定性、转向操纵能力和制动距离等方面得到兼顾，因此目前很少被采用。

**4. 一通道式**

特点是结构简单、成本低等，在轻型载货车上广泛应用。

## 6.2　汽车安全气囊系统

图 6-11 所示的汽车安全气囊系统是一种被动式安全保护装置，是汽车乘员辅助保

护系统的一个重要组成部分。安全气囊系统又称为辅助防护系统(Supplemental Restraint System, SRS)。安全气囊系统的功用是当汽车遭受碰撞导致车速急剧变化时,气囊迅速膨胀,在驾驶员、乘员与车内构件之间迅速铺垫一个气垫,使驾驶员、乘员头部与胸部压在充满气体的气囊上,利用气囊的阻尼作用和气囊排气节流的阻尼作用来吸收人体惯性力产生的动能,从而减轻人体遭受伤害的程度。

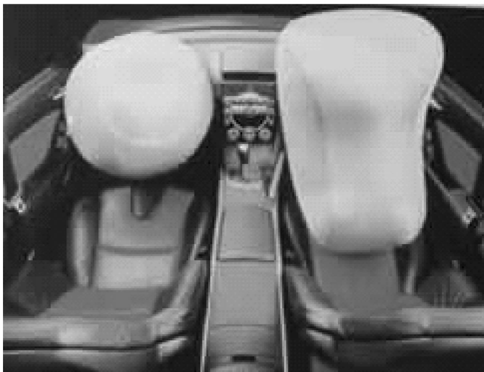


图 6-11 汽车安全气囊系统

## 6.2.1 汽车安全气囊系统的工作原理

当汽车发生碰撞事故时,汽车和障碍物之间的碰撞称为一次碰撞,一次碰撞的结果导致汽车速度急剧下降,一般降到速度为零的时间为 150ms 左右。由于惯性的作用,当汽车急剧降速时,乘员要保持原来的速度向前运动,于是就发生了乘员和转向盘、仪表板、风窗玻璃等之间的碰撞,从而造成乘员的伤亡,乘员和汽车内部结构之间的碰撞称为二次碰撞。汽车安全气囊的基本思想是在发生一次碰撞后,二次碰撞前,由传感器接收撞击信号,只要达到规定的强度,传感器即产生动作并向电子控制器发出信号。电子控制器接收到信号后,与其原储存信号进行比较,若达到气囊展开条件,则由驱动电路向气囊组件中的气体发生器送去启动信号。气体发生器接到信号后引燃气体发生剂,产生大量气体,经过滤并冷却后进入气囊,使气囊在极短的时间内突破衬垫迅速展开,在乘员和汽车内部结构之间打开一个充满气体的袋子,使乘员扑在气袋上,避免或减缓二次碰撞,从而达到保护乘员的目的。安全气囊对人体进行保护作用的原理如图 6-12 所示。

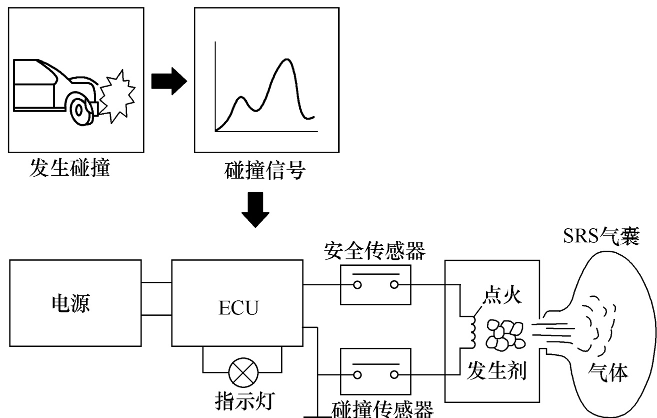



图 6-12 安全气囊对人体进行保护作用的原理图

### 6.2.2　汽车安全气囊系统的组成及结构原理

安全气囊系统主要由如图 6-13 所示的控制装置、气体发生器和气袋组成，其中控制装置又包括传感器、电子控制系统及触发装置。其工作原理为：在发生碰撞事故时，传感器感受汽车碰撞强度，电子系统接收并处理传感器的信号。当判断有必要打开气袋时，立即由触发装置发出点火信号触发气体发生器，气体发生器收到信号后迅速产生大量气体，并充满气袋，使得乘员能够与一较柔软的吸能缓冲物件相接触，而不是与汽车的内饰件猛烈碰撞。依靠气袋的排气孔节流阻尼来吸收碰撞的能量，从而达到减少伤害保护乘员的目的。

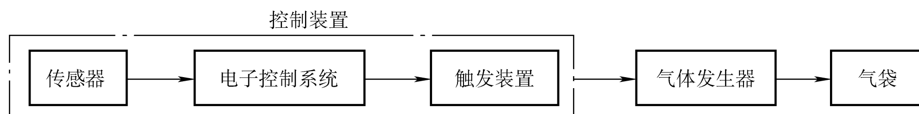
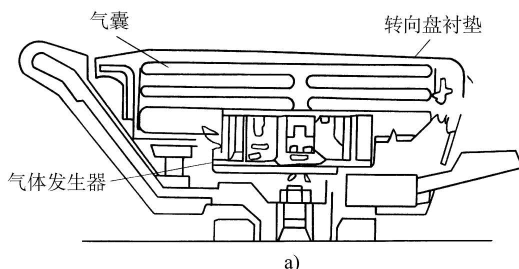



图 6-13　安全气囊系统组成

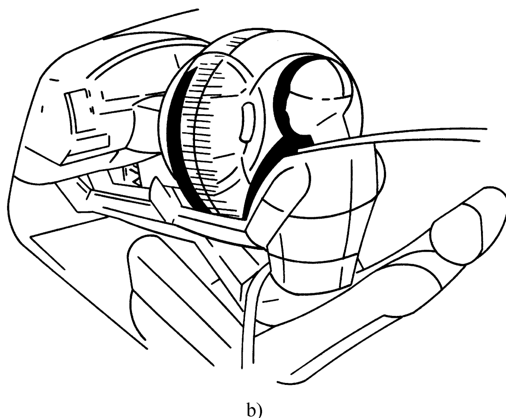
#### 1. 安全气囊

驾驶员侧气囊位于转向盘中心处，如图 6-14 所示。副驾驶员侧气囊位于仪表板右侧上方。安全气囊主要由气体发生器、气囊、衬垫和螺旋形电缆 4 部分组成。

安全气囊的全部动作完全由 CPU 的程序控制，按照人们预先设计的工作内容与步骤逐条执行。工作程序框图如图 6-15 所示。




a)



b)

图 6-14　安全气囊结构和工作图
a）气囊结构图　b）气囊工作展开图

汽车的点火开关闭合后，气囊就开始工作。首先把 CPU 等电子电路复位，紧接着是自检工作，专门由自检子程序对各传感器、引爆器、RAM、ROM、电源等部件逐个进行检查。如有故障，先执行总的故障显示灯显示子程序，使故障灯发出闪烁亮灯信号，驾驶员迅速把故障码读取开关合上，读取故障码，查出气囊故障部位。如果自检气囊无故障，则启动传感器采集子程序，对所有传感器进行巡回检测。如没有碰撞，程序又返回到自检子程序。如果一直没有

碰撞则程序就这样循环下去。如果有碰撞，经 CPU 的判断，如碰撞速度小于 30km/h 时，CPU 发出引爆双安全带预紧器的指令，点燃双安全带预紧器，拉紧双安全带，保护乘员，并且发出光电报警指令；如碰撞速度大于 30km/h，则 CPU 向所有的引爆器发出引爆指令，使两个安全带拉紧，两个气囊张开，同时发出光电报警指令；如果在较高速度碰撞，则主电源断线，电源监控器自动启用备用电源，支持整个系统工作，并使报警工作直至备用电源耗尽。

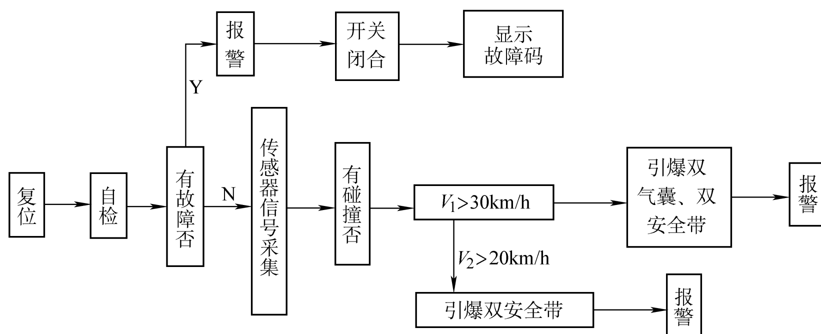



图 6-15　安全气囊的工作程序

例如，某汽车以 50 km/h 的速度与前方障碍物相撞，安全气囊引爆时序为：在撞车 10ms 后，达到引爆系统引爆极限，产生大量的炽热气体。此时，驾驶员由于惯性仍然坐着。20ms 后驾驶员开始移动，但还没有与气囊接触。40ms 后气囊已完全胀起，驾驶员逐渐向前移动，安全带被拉长，人的部分冲击能量已被吸收。60ms 后驾驶员已开始沉向气囊。80ms 后驾驶员的头部和身体上部沉向气囊。气囊的排气口打开，其中的气体在高压下匀速地逸出，以吸收能量。100ms 后车速已降为零，这时对车内乘员来说，危险期已结束。110ms 后驾驶员向前移动已达到最大距离，随后身体开始后移，回向座位。这时大部分气体已从气囊中逸出，前方又恢复了清晰的视野。

在汽车碰撞至乘员碰撞之间有一时间间隔，约 0.05s，就这一点时间给防撞安全气囊提供了工作机会，防撞气囊在瞬间充满气体，在乘员前面形成一道柔软的弹性屏障，弹性体使力的作用时间延长，因而使加速度减小，作用力也随之减小；柔软接触面使力的作用面积加大，防止作用力集中压在乘员头部突出部分。因此，防撞安全气囊的工作对乘员起到了保护作用。

**2. 安全气囊传感器**

安全气囊传感器在防撞安全气囊系统中用来测定碰撞强度，将碰撞强度转换为电信号，输入电子控制装置，作为是否启动防撞气囊的计算参数。

传感器的性能应达到如下要求：在人体可能受到极轻微损伤的情况下，传感器对于展开安全气囊的判断应该是否定的；而在人体可能受到严重损伤必须使用安全气囊时，传感器必须及时发出信号使安全气囊得以展开，即必须在最大的允许时间之前展开安全气囊。

最大的允许时间是指当发生碰撞事故时，人体在加速度的作用下向前运动，到距离气囊一定位置，气囊必须展开以准备同人体接触，有效保护人体免受损伤所需的最

大时间。

如果人体运动到距离气囊很近时，气囊还没有展开，爆发的气囊极可能对人体造成损伤。因此，必须利用人体的运动距离来确定传感器启动安全气囊的时间。对于高速碰撞事故，传感器要符合 12.7cm/30ms 准则。这个准则的含义是：汽车碰撞过程中，乘员在未系安全带的情况下，乘员胸部向前移动达到 12.7cm 时刻的前 30ms 时刻为气囊的目标点火时刻。

传感器种类很多，按功能不同，可分为碰撞传感器和安全传感器两种。碰撞传感器主要用来检测碰撞的强度。若达到规定强度，则使气囊展开，产生保护。所谓规定强度，即是若汽车以 40km/h 的车速与一辆正在停放的同样大小的汽车相碰撞的程度，或者以不低于 22km/h 的车速迎面撞到一个不可变形的固定障碍上时的碰撞程度。安全传感器有保险作用，用来防止因碰撞传感器短路而造成气囊误展开。

按结构型式不同，传感器又可分为电子式、机电式和机械式 3 类。按其在汽车上的分布位置不同，还可分为前气囊传感器、中央气囊传感器、安全传感器 3 种。

前气囊传感器安装在两侧前翼子板内，当减速度超过预定值时，开关闭合，从而向电子控制装置发出触发信号。中央气囊传感器安装于电子控制装置内，而电子控制装置安装在仪表台中央下端。图 6-16 所示为该传感器芯片的构造。

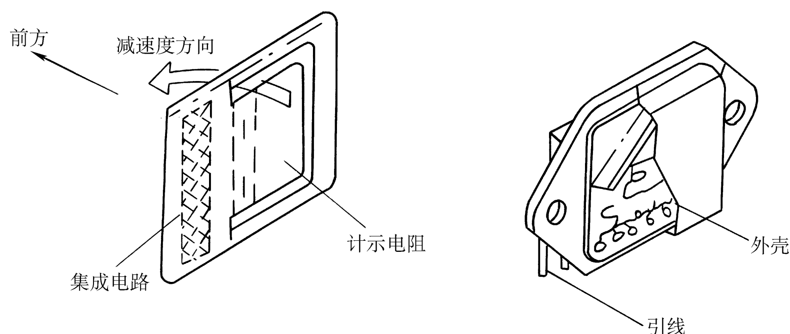



图 6-16　中央气囊传感器

在 N 型系列基板上扩散 P 型硅层，形成测试阻抗的半导体压电阻。作用于悬臂梁的减速度，使梁由于质量作用而扭曲，便可测量阻抗变化。在硅基板上的压电阻及前置放大器、高通滤波器、主放大器的信号处理电路整体组装在双极集成电路上，以避免受到传感器噪声的影响。这种集成化加速度传感器芯片，安装在密封盒中，并充满了硅油。硅油以悬臂梁的固有振动频率被迫共振。安全传感器安装在电子控制装置内，是一个以水银为导体的常开开关，如图 6-17 所示。

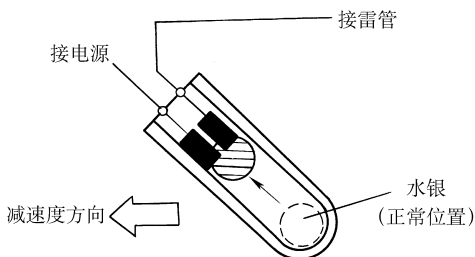



图 6-17　安全传感器

当汽车发生碰撞且减速度超过一定值时，水银便在惯性作用下，接通触点，安全

传感器闭合。此传感器设定的减速度值比前气囊传感器和中央气囊传感器的要小。安全传感器只有在车辆前方发生碰撞时才对减速度作出响应，除此以外的其他原因，即使中央气囊传感器和前气囊传感器输出信号，只要安全传感器无输出信号则判定车辆无碰撞，以防止在不必要情况下展开安全气囊。

**3. 电子控制装置**

电子控制装置是安全气囊系统的控制中心，其功能是接受碰撞传感器及其他各传感器输入的信号，判断是否点火引爆气囊充气，并对系统故障进行自诊断。

电子控制装置由稳压电路、备用电源电路、气囊系统侦测电路、点火控制引爆电路、触发传感器和故障自诊断电路等部分组成。

汽车安全气囊系统中引发器点火判断逻辑电路如图 6-18 所示。

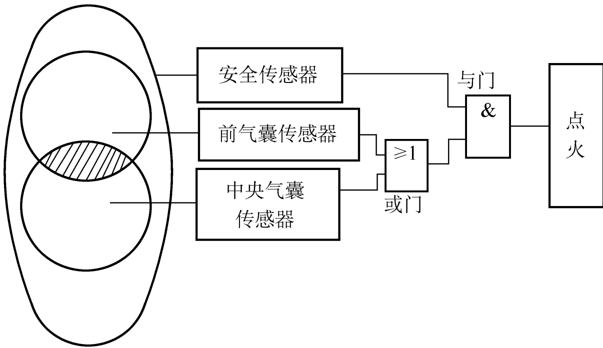



图 6-18　气囊点火判断逻辑电路

## 6.3　汽车巡航控制系统

汽车巡航控制系统（Cruise Control System，CCS）一般又称为巡航行驶装置、速度控制（Speed Control）系统、自动驾驶（Auto Drive）系统等。它是指汽车在行驶过程中不需踩动加速踏板便可按照驾驶员的要求，自动保持一定的行车速度，减轻驾驶员操作劳动强度，提高汽车舒适性的自动行驶装置。它的作用是按司机所要求的速度闭合开关之后，不用踩油门踏板就可以自动地保持车速，使车辆以固定的速度行驶。采用了这种装置，当在高速公路上长时间行车时，司机就不用再去控制油门踏板，减轻了疲劳，同时减少了不必要的车速变化，可以节省燃料。

### 6.3.1　汽车巡航控制系统的功能及优点

**1. 汽车巡航控制系统的功能**

（1）基本功能

1）车速设定。当按下车速调置开关后，就能存储该时刻的行驶速度，并能保持这一速度行驶。

2）消除功能。当踩下制动踏板时，上述功能立即消失。但上述调置速度继续存

储。

3）恢复功能。当按恢复开关时，则能恢复原来存储的车速。

4）滑行。继续按下开关进行减速，以离开开关时的速度作巡航行驶。

5）加速。继续按下开关进行加速，以不操纵开关时的车速进入巡航行驶。

6）速度微调升高。在巡航速度行驶中，当操纵开关以 ON-OFF（接通-断开）方式变换时，使车速稍稍上升。

（2）故障保险功能。

1）低速自动消除功能。当车速小于 40km/h 时，存储的车速消失，且不能再恢复此速度。

2）制动踏板消除的功能。在制动踏板上装有两种开关，一个用于对计算机的信号消除；另一个是直接使执行元件停止工作。

3）各种消除开关。除了利用制动踏板的消除功能外，还有驻车制动、离合器（M/T）、调速杆（A/T）等操作开关的消除功能。

**2. 汽车巡航控制系统的优点**

综合其功能作用，汽车巡航控制系统主要具有以下的优点：

1）提高汽车行驶时的舒适性。特别是在郊外或高速公路上行驶，这种优越性更为显著。另外，当汽车以一定的速度行驶时，减少了驾驶员的负担，使其可以轻松地驾驶。

2）节省燃料，具有一定的经济性和环保性。在同样的行驶条件下，对一个有经验的驾驶员来说，燃料可节省 15%。这是因为在使用了这一速度稳定器以后，可使汽车的燃料供给与发动机功率之间处于最佳的配合状态，并减少了废气的排放。

3）保持汽车车速的稳定。汽车无论是在上坡、下坡、平路上行驶，或是在风速变化的情况下行驶，只要在发动机功率允许的范围内，汽车的行驶速度保持不变。

## 6.3.2 汽车巡航控制系统的工作原理

汽车巡航控制系统是最早开发的汽车电子控制系统之一。这种系统使用另外的车速传感器，将车速信号输入发动机控制微机，由微机控制真空系统工作。这种系统也要使用伺服器、车速控制开关杆和制动踏板上的真空解除开关等，其功能和基本系统相同。在这个系统中，电子控制装置可根据行驶阻力的变化，自动调节发动机油门开度，使行驶车速保持恒定。这样既减少了不必要的车速变化，节省了燃料，同时也减轻了驾驶员的负担。电子巡航控制系统的框图如图 6-19 所示。

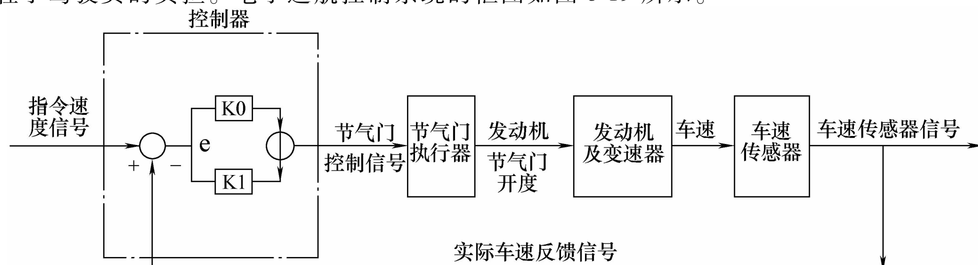



图 6-19 电子巡航控制系统的框图

控制器有两个输入信号，一个是驾驶员按要求设定的指令速度信号，另一个是实际车速的反馈信号。电子控制器检测这两个输入信号之间的误差后，产生一个送至节气门执行器的节气门控制信号。节气门执行器根据所接收的控制信号调节发动机节气门开度以修正电子控制器所检测到的误差，从而使车速保持恒定。实际车速由车速传感器测得并转换成与车速成正比的电信号反馈至电子控制器。作为巡航控制系统核心部件的控制器采用一种称为比例积分控制（简称 PI 控制）的电子控制装置。节气门控制信号实际上由两部分叠加而成。线性放大部件 KP 提供一个与误差信号 e 成正比的控制信号，而积分放大器 KI 则设置一条斜率可调整的输出控制线，用来将这一段时间内的车速误差降为零。实际上并不能真正降低到零，而是保持在一定的误差范围内，因为当车速误差为零时，行驶阻力的微小变化都将引起节气门开度的变化，容易产生游车。

## 6.3.3　电子式巡航控制系统

图 6-20 所示为现代汽车电子巡航控制系统的构造与零部件布置图。电子巡航控制系统主要是由指令开关、传感器、电子控制器和节气门执行器四部分组成。各种开关与计算机被配置在车室内；执行元件、真空泵则配置在发动机室内，执行元件的控制线缆与加速踏板相联接。

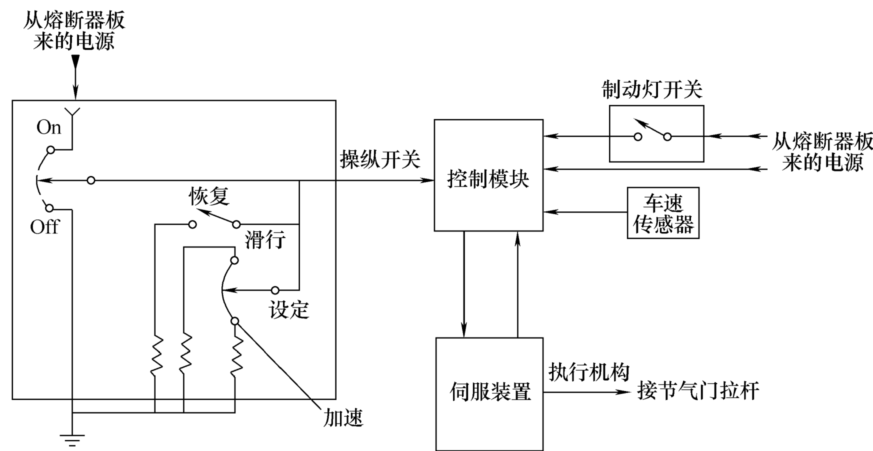



图 6-20　电子巡航控制系统的构成

### 1. 指令开关

指令开关包括主控开关、离合器开关、变速器空档启动开关、制动开关（包括驻车制动）和电源开关（点火开关）等。

1）主控开关的作用是控制巡航系统的启动、关闭，控制调节巡航工作状态。

2）离合器开关（仅对安装手动变速器车辆）的作用是：当汽车在巡航状态下行驶，出现驾驶员干预，如变换变速器档位、制动等情况，驾驶员踩踏离合器踏板，离合器开关即由断开变为闭合，离合器开关的闭合，使电控单元立即自动关闭巡航工作状态。离合器开关装在驾驶室离合器踏板的上部，靠驾驶员踩踏离合器踏板的机械动作使其闭合。

3）变速器空档启动开关（仅对安装自动变速器车辆）的作用与离合器开关类似。空档启动开关的安装位置紧靠变速器操纵杆，并与变速器操纵杆联动，当变速器操纵杆置于空档时，空档启动开关由断开变成闭合。

4）刹车灯开关的作用是：当驾驶员踩踏制动踏板时，在制动（接通）灯亮的同时，将控制节气门动作摇臂的电磁离合器断开，迅速退出巡航控制的工作状态。在刹车灯开关中原来常开触点的基础上，增加了与之联动的常闭触点。当驾驶员踩踏制动踏板，制动灯亮的同时，常闭触点断开，电磁离合器断电，节气门不再受巡航系统控制。

5）驻车制动开关的作用与离合器开关（变速器空档启动开关）类似。安装位置紧靠驻车制动操纵杆并与驻车制动操纵杆联动。当拉驻车制动时，此开关由断开变为闭合。

6）点火开关的主要作用是通断取自蓄电池和发电机的巡航控制的工作电源。

**2. 传感器**

传感器主要包括车速传感器、节气门传感器和节气门控制摇臂位置传感器等。

1）车速传感器通常和车速里程表驱动装置相连。如果车速表是电子式的，车速表传感器给出的信号可直接用作巡航控制系统的反馈信号，因而不必为巡航控制系统另外设置传感器。专用于巡航控制系统的车速传感器一般安装在汽车变速器输出轴上，因为实际车速与变速器输出轴转速成正比。车速传感器有光电式、霍尔感应式、磁阻式等多种结构形式。最简单且最常用的是磁阻式，其结构如图 6-21 所示。

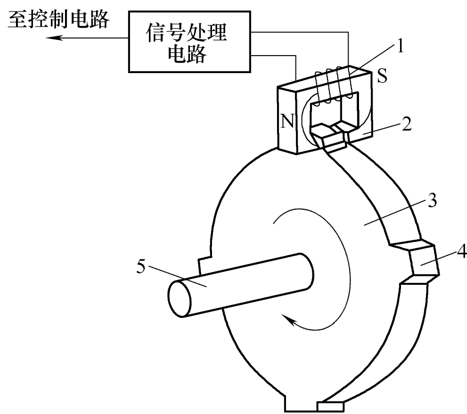



图 6-21　磁阻式车速传感器结构图

1—传感线圈　2—磁铁　3—钢盘

4—凸轮　5—变速器输出轴

带凸齿的钢制圆盘安装在变速器输出轴上并随输出轴一起转动。当凸齿位于磁铁两极之间时，由于钢的导磁性能远高于空气隙，磁回路磁阻突然减小，从而在传感线圈中产生一高的脉冲电压信号。我们注意到变速器输出轴每转一周，四个凸齿各通过传感线圈一次。因此信号处理电路计数一分钟内传感线圈中的电压脉冲数除以 4 就可得到 r/min 表示的变速器输出轴转速。

2）节气门传感器的作用是：对电控单元提供一个与节气门位置成比例变化的电信号。节气门传感器与发动机电控的传感器共用。

3）节气门控制摇臂传感器，这是巡航控制系统专用的传感器。它的作用是对电控单元提供节气门控制摇臂位置的电信号，目前应用较多的是滑线电位计式。当节气门控制摇臂转动时，电位计与之转动，便输出一个与控制摇臂位置成比例、连续变化的电信号。

**3. 执行器**

执行器作用是将电控单元输出的电流或电压信号转变为机械运动，进而控制节气门的开度，最终达到控制车速的目的。执行器有电动和气动操纵两种形式。

1）气动方式大多采用有进气歧管真空度控制的气动活塞式结构。气动操作的节气门执行器的组成如图 6-22 所示。

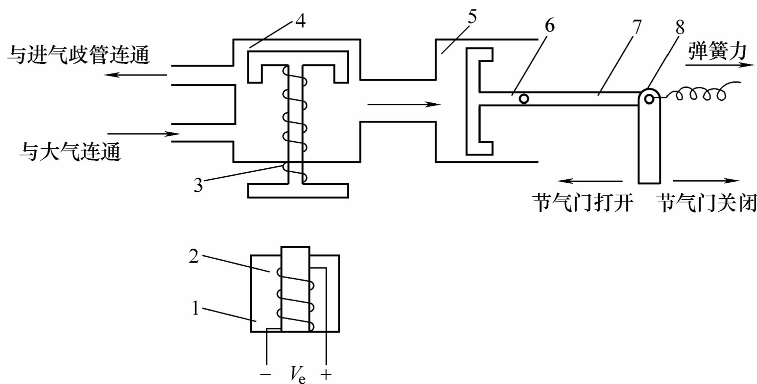



图 6-22　气动操纵的节气门执行器的原理图

1—电磁铁　2—电磁线圈　3—阀弹簧　4—压力控制阀　5—气缸　6—活塞　7—连杆　8—节气门拉杆

执行器活塞连杆与节气门拉杆相连，而活塞连杆对节气门拉杆无力作用时，弹簧力使节气门关闭。当执行器输入信号 $V_e$ 给电磁线圈通电时，压力控制阀芯克服阀弹簧力下移，执行器气缸与进气歧管连通。由于进气歧管内为真空，于是执行器气缸压力迅速下降，执行器活塞带动节气门拉杆向左运动从而使节气门平顺渐进地打开。活塞上的作用力随气缸中平均压力的变化而变化，而气缸中的平均压力则通过快速通断压力控制阀来控制。执行器的输入信号 $V_e$ 是一脉冲电压信号，当 $V_e$ 电位为高时，电磁铁通电；当 $V_e$ 电位为低时，电磁铁断电。因此气缸中的平均压力亦即节气门开度与压力控制阀控制信号 $V_e$ 的占空比成正比。

2）电动机式类型。电动机式的节气门执行器的工作，是利用电动机的转动并带动控制摇臂摆动，可使节气门的开度变化，主要有电磁离合器、直流电动机或步进电动机等。直流电动机是连续运转，它的运转速度与电控单元供给它的电压平均值有关；它的运转或停止，由电控单元输出的电压“有”或“无”来决定；它的运转方向，由电控单元输出的电压方向决定。步进电动机的工作，是对其通电一次，电动机轴就转过一定的角度。

电磁离合器的作用是，当电磁离合器通电时，电动机的轴与节气门控制摇臂结合在一起，当电磁离合器断电时，电动机轴与节气门控制摇臂分离，使节气门受到电动机和电磁离合器的双重控制，工作更可靠。

**4. 电子控制器**

电子巡航控制系统的另一个重要部件就是电子控制器，也称为巡航电脑。控制器是整个控制系统的中枢。在早期的巡航控制系统中，控制器大多采用模拟电子技术，其原理图如图 6-23 所示。

整个控制器采用了 4 个运算放大器，每个放大器都有自己特定的用途。运算放大器 1 用作误差信号放大器，它的输出与指令车速和实际车速之差成正比。误差信号 $V_e$ 用作运算放大器 2 和 3 的输入。运算放大器 2 是一个放大倍数为 $K_P = -R_2/R_1$ 的线性放

大器，由于 $R_1$ 是可变的，因此放大倍数可以调节。运算放大器 3 是一个积分器，其放大倍数为 $K_1 = 1/(R_3)C$。$R_3$ 是可变电阻，因而 $K_1$ 也可调。运算放大器 3 产生一流向电容 C 的电流，其电流与流经 $R_3$ 的电流相等。$R_3$ 两端的电压即为误差放大器的输出电压 $V_e$。根据欧姆定律，可得 $R_3$ 上的电流为：$I = V_e/R_3$。

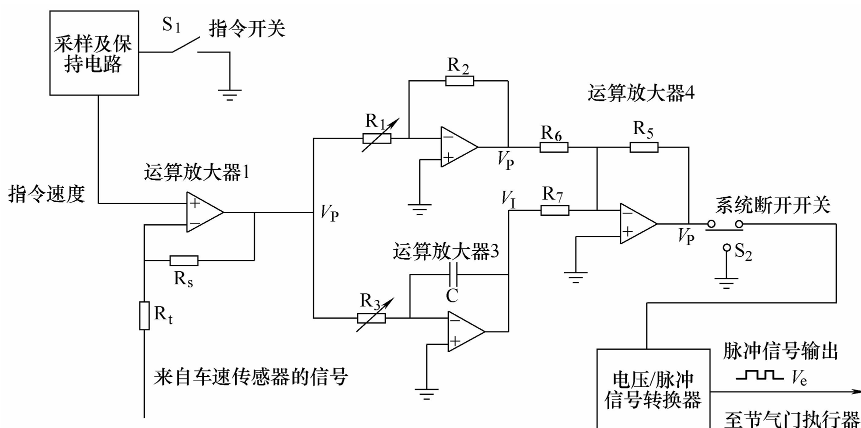



图 6-23　采用模拟电子技术的控制器原理图

若误差信号 $V_e$ 保持不变，则电流 $I$ 也保持不变。电容 C 两端的电压将以与电流成正比的速率稳定变化。积分器输出电压根据 $V_I$ 是大于 0 还是小于 0 而上下变化，仅当误差恰好为 0 时才保持不变。这就是为什么积分放大器能将系统的稳态误差降至 0 的原因。因为只要出现小的误差就会引起 $V_I$ 变化从而予以修正。当然，实际上为了避免游车现象，并不是将车速误差真正降为 0，而是保持在一定的误差范围内。误差范围的大小决定于控制线斜率，亦即 $K_I$ 的大小。

线性放大器和积分放大器的输出通过运算放大器 4 叠加在一起，运算放大器 4 将电压 $V_p$ 和 $V_I$ 相加并将运算结果反相。这里反相是必要的，因为线性放大器和积分放大器的输出相位与其输入相位是相反的。求和反相后方使控制信号回到正确的极性。运算放大器 4 产生一模拟电压输出 $V_s$。这个模拟电压必需先转换成脉冲信号才能驱动油门执行器。为此采用了一个将模拟电压转换为电压脉冲信号的转换器。转换器的输出 $V_e$ 直接驱动执行器的电磁线圈。

图 6-23 中有两个开关 $S_1$ 和 $S_2$。指令开关 $S_1$ 由驾驶员置位用来选定指令车速，它向采样及保持电路发送信号让其对已选定的指令车速采样并记忆下来。采样及保持电路的原理图如图 6-24 所示。

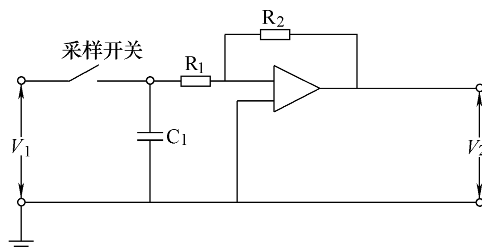



图 6-24　采样及保持电路原理图

$V_1$ 表示由驾驶员选定的指令车速信号，$V_1$ 采样后向电容 $C_1$ 充电。电容器电荷由一个具有高输入阻抗的放大器进行检测。运算放大器向误差信号放大器输出一个与指令车速成正比的电压 $V_2$。开关 $S_2$ 通过

中断油门执行器的控制信号来断开巡航控制执行器。当点火开关断开，控制器断开或制动踏板踩下时，开关 $S_2$ 就会自动将系统断开。当驾驶员接通指令速度开关 $S_1$ 时，开关 $S_2$ 就接通。

## 6.3.4　主动巡航控制系统

定速巡航控制系统是轿车中一个比较常见的配置，它使长途驾驶更为轻松。不过传统的定速巡航控制也有它的不足，当遇到前面的慢车时需要驾驶者重新设置定速巡航的速度或解除定速巡航。如何解决这个不足呢？现在，高档轿车中开始装备主动巡航控制系统。它可以代替司机控制车速，避免了频繁的取消和设定巡航控制，使巡航系统适合于更多的路况，为驾驶者提供了一种较为轻松的驾驶方式。巡航系统控制柄位置如图 6-25 所示。

主动巡航控制类似于传统的巡航控制，同样是保持设定的车速，不同的是新系统能够自动调节车速以保证与前车有足够的安全距离。主动巡航控制系统（Adaptive Cruise Control，ACC），主要由雷达传感器、方向角传感器、轮速传感器、制动控制器、扭矩控制器和发动机控制器等组成。

在驾驶过程中，驾驶者设定所希望的车速，系统利用低功率雷达或红外线光束得到前车的确切位置，如图 6-26 所示。如果发现前车减速，系统就会发送执行信号给发动机或制动系统来降低车速使车辆和前车保持一个安全的行驶距离；当前方道路没车时又会加速恢复到设定的车速，如图 6-27 所示。由于车辆不仅仅在直线行驶，也要考虑在弯道中的使用。在多车道公路上行驶时，系统根据转向盘转动的角度可以识别自己所在车道上的车辆和相邻车道的车辆，避免出现错误判断。




图 6-25　巡航系统控制柄位置



图 6-26　车头的雷达探测器

此外，系统工作时，它与前方车辆的距离以秒衡量而不是米，这将确保系统在目前的行驶速度下有足够的反应时间。带启停式行车功能的主动巡航控制系统令驾驶更加轻松和安全。如需调整速度，系统则依据动态稳定控制系统和导航系统的数据计算出需要的安全速度。

现在的主动巡航控制系统提供两种控制模式——定速控制和车距控制。车距控制通过车载雷达探测前车距离。雷克萨斯轿车的主动巡航控制系统有三个距离设置，在

车速为 80km/h 的时候，系统自动调节车速，和前车距离维持在 15 ~ 25m 之间。宝马装备主动巡航控制系统有四个距离设置，高精度的毫米波的雷达可以探测到前方 150m 的车辆，使用的速度范围为 30 ~ 180km/h。




图 6-27　汽车雷达工作过程

# 6.4　汽车用激光雷达

随着汽车的快速普及，城市道路的堵塞和交通事故的日益增加，已成为一个大的社会问题。欧美及日本等国进行了许多“利用汽车和道路的智能化来提高安全性和实现交通效率化”的研究，如美国的“智能车辆高速公路系统”，欧洲的“具有最高效和空前安全度的欧洲交通计划”，日本的“先进安全车辆”、“超级灵巧车辆系统”、“车辆信息和通信运输系统”、“先进道路运输系统”和“通用交通管理系统”，它们都是以电子技术为中心的先进技术及其应用技术。研究汽车前方监视和探测障碍物用的红外激光雷达，对车辆和行人都有实用价值。

## 6.4.1　汽车用激光雷达的测距原理

脉冲雷达使用时向自己车辆的前方照射红外激光短脉冲，然后测定发射光从障碍物等目标返回的时间 $\Delta t$，则距离 $R = c\Delta t/2$，式中 $c$ 为光速，如图 6-28 所示。

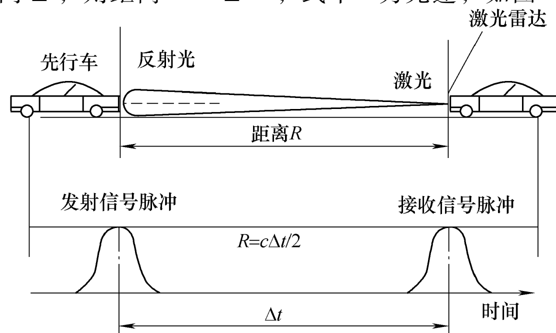



图 6-28　脉冲雷达测距原理

## 6.4.2　汽车用激光雷达的系统构成和测量方式

图 6-29 给出了系统方框图。由激光二极管（LD）振荡发射出的发射光脉冲，由发射光透镜收缩成所规定的光束，再用扫描镜左右扫描，向空间发送，照射在前方车辆和障碍物等目标上。由目标反射回来的光从扫描镜经由接收光透镜、光纤、被导入到信号处理装置内的光敏二极管（PD），再用计数器回路计数激光二极管的启动脉冲信号和光敏二极管的终止脉冲信号时间，将距离数据输出。利用位置探测器（PSD）测定反射镜的角度，将角度数据输出。这样，就能测出被测物的二维位置（距离、角度）。

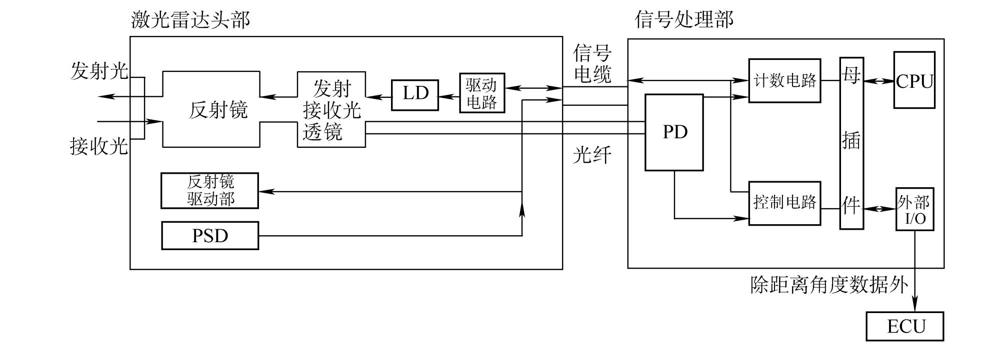



图 6-29　激光雷达系统方框图

由于通过光纤把接收光从雷达头部导入到信号处理装置内的光敏二极管（PD）中，光敏二极管（PD）和接收回路部与雷达头部分离，所以，雷达头部装置可实现小型化。本系统的最大特征是扇形射束的水平方向幅度窄，垂直方向幅度宽，并可进行宽幅高速扫描。

## 6.4.3　汽车用激光雷达的技术指标（见表 6-1）

表 6-1　汽车用激光雷达的技术指标

| 发光原件 | 脉冲激光二极管 |
|---|---|
| 激光波长 | 0.9μm |
| 发射光输出（峰值） | 12W |
| 脉冲宽度 | 15ns |
| 脉搏冲往频率 | 8.8kHz |
| 光接收元件 | 雪崩光敏二极管 |
| 发射光透镜直径 | $\phi$10mm |
| 光接收透镜直径 | $\phi$20mm |
| 扫描方式 | 反射镜往复旋转 |
| 扫描周期 | 30ms |
| 测定数据 | 267 数据 |
| 头部部分大小 | 140mm × 75mm × 85mm |

行驶中的车辆，随着路面的变化和车辆的运动，车体的方向要发生变动。这种变动中，上下方向的变动称为纵向运动，成为安装在车辆前部的激光雷达逃避目标的原因。

采用该系统时，由于水平为细射束，增大了单位面积的能量密度，所以使探测距离增大；而垂直方向成宽的扇形，所以不会因为车辆的纵向运动而减少探测机会；又因为是其射束沿水平、大角度扫描，所以，即使是在崎岖不平的路上行驶，也能正确地捕获到前方车辆。另外，即使是在潮湿的路面上，为了使车辆从 100km/h 的行驶状态中探测到前方停止的车辆，能在不发生碰撞的情况下停下来，最大探测距离设为 120m。为了能探测到高速公路上的最小曲率半径为 300m 的弯曲路面上的障碍物，设扫描角为 400mrad。

## 6.4.4　汽车用激光雷达的性能测试结果

### 1. 最大探测距离

表 6-2 给出了对车辆的最大探测距离数据，表 6-3 给出了对穿不同服装的人的探测距离。对于小轿车（在车上，实际上的目标是反射非常强的车子后部的反射镜），晴天时最大探测距离为 150m 以上，即使 10mm/h 的降雨时，也能探测到 140m，所以目标距离肯定能达到 120m。

表 6-2　最大探测距离——目标物：车辆

| 条件 | 距离 |
|---|---|
| 晴天 | 150m 以上 |
| 雨天（降雨量：10mmh 以上） | 140m |

表 6-3　探测距离——目标物：人

| 服装的种类 | 距离 |
|---|---|
| 白色　聚酯　工作服 | 55m |
| 白色　棉衬衫　短裤 | 47m |
| 灰色　毛　成套西服 | 52m |
| 灰色　毛　成套西服 | 40m |
| 黑色　聚酯　连衣裙 | 34m |

对人的探测距离为 34 ~ 55m，根据服装的颜色和质地不同而有很大差异。原因估计是由于服装的颜色、质地、编织方法不同，其反射率也不同，对探测距离有很大影响。一般，高速公路上没有行人，一般的道路时，车辆的速度慢，必要制动距离相当短，认为对人的探测距离有 45m 左右就足够了，就是按照该机现在的探测能力也可以说很有实用价值了。另外，即使是在类似表 6-3 中穿黑色连衣裙那样的条件不好时，探测距离为 34m，为了确保 45m 目标距离，如果只增加发射输出的话，要想达到与雷达方程式一样的效果，该机的输出则需要增加 3 倍左右。

### 2. 性能

测距精度：　3～4m

最小探测距离：　3m

方位精度：　4mrad

**3. 激光器发射接收窗口的沾污**

汽车在行驶时，安装在车辆前部的激光雷达受到土、尘埃、雨水等的沾污，污垢粘附在发身接收光窗口上，影响了探测能力。当发射和接收的窗口受到沾污时，对垂直方向视场进行测量，探测视场缩小的程度如图 6-30 所示。

对于一般行驶一周到 10 天左右所粘附的污垢（图中符号 b）来说，可以探测 120m 以上，探测视场也不会减小。其次是汽车耐久试验用的试车跑道。因为在泥泞道上行驶，所以上面粘附有泥水（符号 c）。在这种情况下，近、中距离没有什么问题，但行驶时视场会减小，车辆颠簸时，目标容易逃脱。解决这种情况的对策是附加沾污诊断功能，当严重沾污时，就向驾驶员报警。

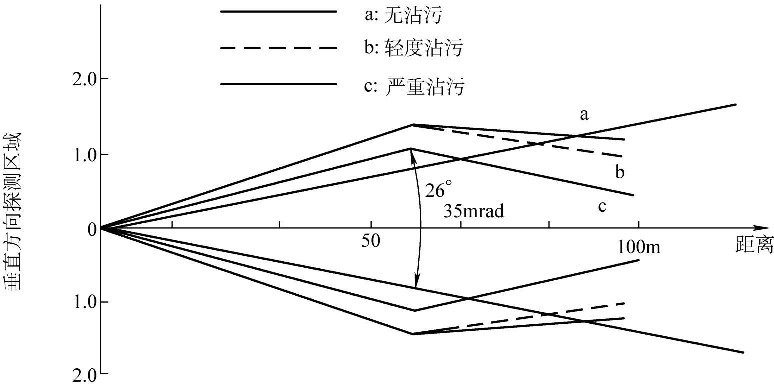



图 6-30　探测领域随着发射接收面的沾污而劣化

**4. 变路探测**

图 6-31 给出了在高速公路曲率半径约 300m 的弯路上的探测情况。

在以 a 车为中心水平成扇状扩展的探测区域内，可以探测前方车辆和多个路侧反射器。这时的测定距离，前方车辆 b 为 75m，远方的路侧反射器 c 为 120m。

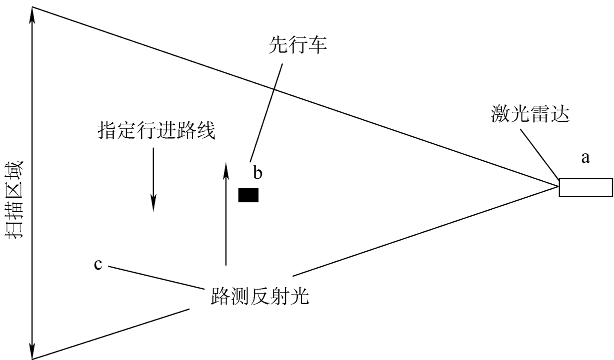



图 6-31　弯道的探测状况

a—本车　b—先行车　c—路侧反射器

实际环境行驶实验的结果表明：本机的探测区域基本能

满足弯路的探测要求。另外，由于可以从本车的车速和转向盘等的车辆状态量信息中推定本车的行进路线，所以，在本机所探测的几个物标中，可以把行驶道路上的前方车辆与其他探测物标区分开来，以免发生危险。

## 6.5　汽车防撞系统

汽车防撞系统是一种可向司机预先发出视听报警信号的探测装置。它安装在汽车上，能在汽车行驶过程中及时探测各种障碍物的距离，并在必要情况下可向司机及乘客发出报警信号，以促使司机采取应急措施来应付特殊险情，避免交通事故的发生。

汽车防撞系统是高科技的产物，它将伴随着光机电一体化技术的进步而得到新的发展。汽车防撞系统的核心在于快速、准确地测量出汽车与障碍物间的距离，并及时发出报警信号，最好还配备自动制动装置以实现防撞。目前国内外出现的汽车防撞系统主要有激光-单片机组合汽车防撞系统、激光雷达汽车自动防撞微机控制系统、相控激光测距系统、红外测距汽车防撞系统、超声波测距系统等。

### 6.5.1　激光-单片机组合的汽车防撞系统

**1. 系统的总体结构**

激光-单片机组合的汽车防撞系统主要由单片机子系统、电源部件、前向检测部件（左右各一组）、后向检测部件（左右各 1 ~ 2 组）、报警部件、LED 拟图形显示器构成。其总体框图如图 6-32 所示。

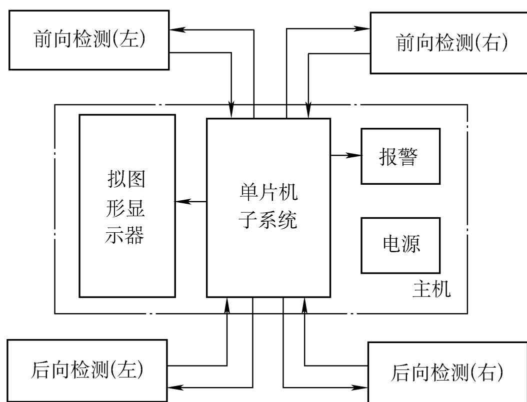


图 6-32　系统总体框图

由单片机子系统、电源部件、报警部件和拟图形显示器构成的主机安排在驾驶室仪表盘上；两个前向检测部件分别安装在汽车驾驶室左右两旁专用后视镜的背面；2 ~ 4 组后向检测部件则安装在车尾后、外侧；主机和前、后向检测部件之间以长线驱动器连接。

**2. 工作原理**

前、后向检测装置是用来测量发射光脉冲从发射到遇见障碍物返回的时间间隔，并将此送往主机。由单片机数据口读入前向检测装置发送的时差信号，而后向发送的时差信号经 HSO/HIS 口得到，再由单片机子系统完成时差到距离的变换、距离显示码和报警信号的输出。对车前、后方和左、右侧障碍物的不同距离分别采用四组红、黄、绿三色二极管作拟图形显示，当距离小于预定值时发出报警信号。

**3. 前、后向检测部件**

（1）前向检测部件　如图 6-33 所示，前向检测采用激光-光电组件，即激光二极管发射，雪崩光敏二极管接收。左右两侧前向检测部件中的激光二极管均旋转 90°角安装，利用其旋转后与平行路面方向成 24°发射角使发射波束在前方 5m 内交叠以取代一维扫描。

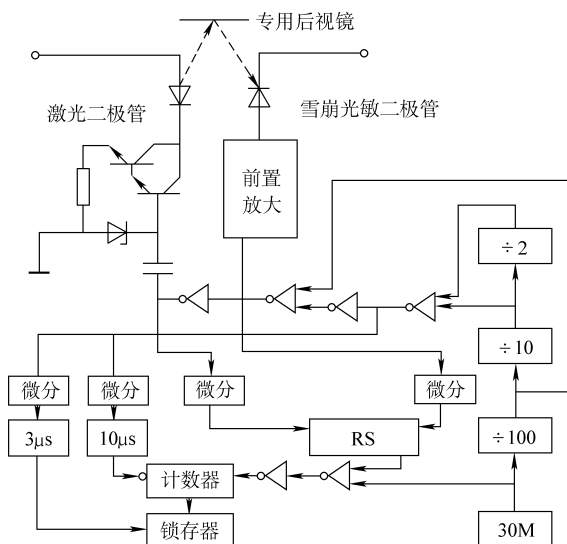


图 6-33　前向检测部件

激光二极管为松下 MEL4744 型，发射波长为 830nm，输出功率为 25mW，正向压降为 2.7V，峰值电流为 125mA，阈值电流为 70mA，漏电流为 0.5mA，旋转 90°角安装后，水平发散角为 24°，垂直发散角为 8°。硅雪崩光敏二极管采用 nip 型，接收波长范围为 500～1100nm，反向偏压为 60～160V，暗电流为 2～30nA，响应时间 0.5ns，量子效率为 150。从 30MHz 晶振取得周期约为 67μs，宽约为 17μs 的发射门控方波，左右两路错开半个周期。每个门控方波发射 5 个周期约为 3.3μs，宽度约为 1.7μs 的脉冲，其前沿将 RS 触发器置 1，且打开计数门对 30MHz 晶振填充脉冲计数，反射脉冲的前沿经前置放大和微分电路将 RS 触发器清零从而关闭计数门。5 次累计计数值经 3μs 延时后锁存，10μs 延时后清零，准备下一轮计数。

（2）后向检测部件　后向检测部件的最大输入电压为 20V，工作频率 40kHz，发射脉冲宽度一般取 200μs，发射后需要有一段大约 1ms 的余振衰减时期。该系统单向有效测程在空气中为 6m。发射控制信号来自单片机的 HSO，接收的电平信号送单片机的 HIS。当单片机 HSO 和 HIS 的时间分辨率均为 2μs 时，后向距离单向检测精度不低于 1mm。图 6-34 为后向检测部件示意图。后向检测装置采用 400ET/R250 型电磁波收发头，且和 LM1812 电磁波收发专

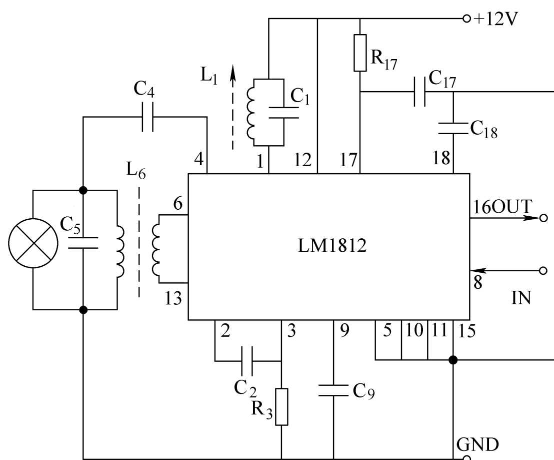


图 6-34　后向检测部件

用集成电路组成单头收发共体系统。LM1812的端子1接LC回路，端子2、3为接收级联，端子4为接收输入，端子6为发射输出，端子8为发射控制输入，端子11为时限保护，端子12接电源，端子13为电源去耦，端子16为接收电平输出，端子17为噪声抑制，端子18外接积分电容。L1采用TOKO公司的CIN—2A 900HM，发射时调谐振荡频率，接收时作为选频负载。L6选用TOKO公司的719VXA—A017A0。

当向LM1812的端子8输入电流1mA（3.6V以上的高电平脉冲）时，端子6将输出峰值功率12W，峰值电流1A，最高频率325KHz的脉冲。经电磁波收发头转换为电磁波发射。遇障碍物返回的发射波通过400ET/R250，再经选频放大、积分检测，最后由端子16输出。从发射到接收的电平输出的时间差反映了最近障碍物到车辆的距离。

**4. LED拟图形显示器**

三色LED拟图形显示器安装在汽车驾驶室内仪表盘上，前左、前右、后左、后右各一组三色LED拟图形显示器以显示障碍物的距离。2个同色LED为一个单元，每组各8个单元。远距离2单元为绿色，中距离2单元为黄色，近距离4单元为红色。前方透光字样依次为200m、150m、100m、75m、50m、25m、15m和5m，后方依次为6m、5m、4m、3m、2m、1.5m、1m和0.5m。图6-35a为平面布置，其与水平线成60°角排列。拟图形显示为点模式或为线模式，线模式使从最远距离到相应距离的发光管全部发光，最多全部单元导通，最大功耗0.3W。点模式只使与最近障碍物距离相应的一个发光管发光，最多4个单元同时导通，最大功耗为0.4W，最大电流为80mA。图6-35b是拟图形显示器单元电路图，当$V_i = 0.3V$时，晶体管截止；当$V_i = 3.6V$时，输入电流约为10μA，流过LED的驱动电流为20mA。

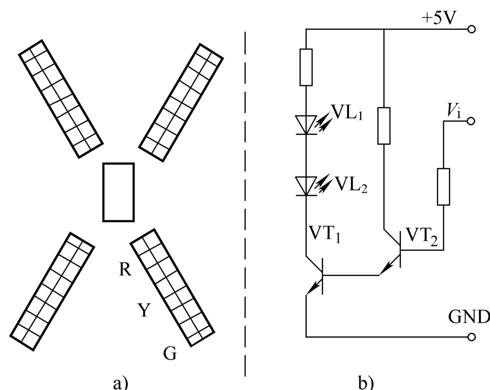



图6-35　三色LED拟图形显示器
a）平面图　b）单元电路

激光-单片机组合的汽车防撞系统，能在正常行驶速度下或慢速倒车时检测和显示前、后方一定距离内有无障碍物，并在必要时报警，从而有效防止车辆在行驶或倒车时发生交通事故。

## 6.5.2　激光雷达汽车自动防撞微机控制系统

**1. 系统的结构组成**

该系统主要由计算机车间距离的激光测距雷达、中央处理器、汽车前后环境状况监测雷达及显示器、发光部、受光部、车速传感器和速度传感器等组成。其总体设计方案如图6-36所示。图6-37是该系统的总体方框图。

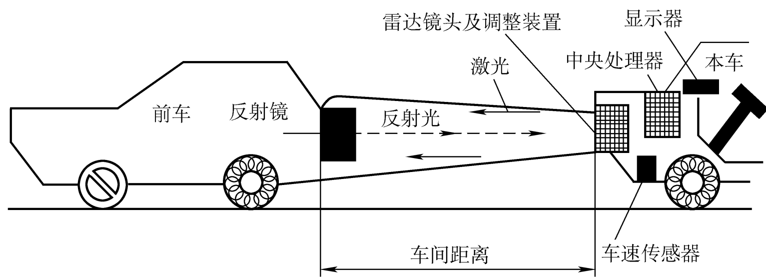



图 6-36　激光雷达自动防撞微机控制系统的设计方案

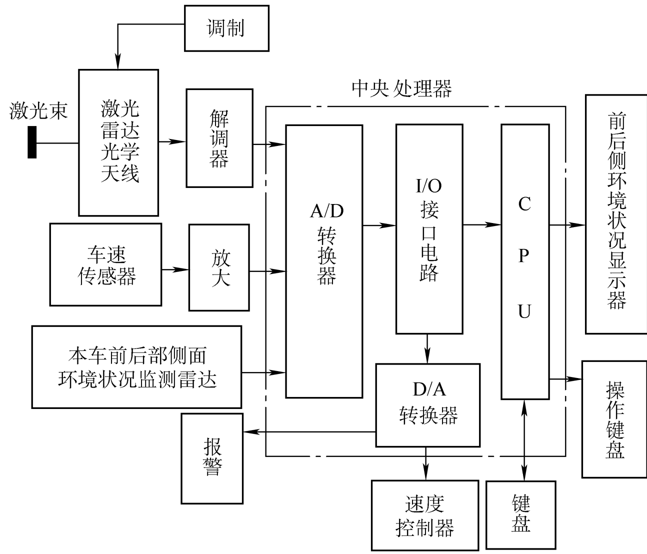



图 6-37　激光雷达自动防撞微机控制系统的总体方框图

**2. 工作原理**

激光测距雷达安装在汽车前部格栅中心。光学天线发射的激光束遇到前面的障碍物后，产生向后散射信号，同样被光学天线接收，并调制出距离和方位信息。不断输出的距离和方位信息经中央处理器分析，可以判断前面物体的运动与否，计算出它相对本车的速度及车间距离，并判断它是否有可能与本车接触，从而决定本车最安全的行驶速度。当可能有危险发生时，系统触动报警装置，发出报警信号。图 6-38 为其工作原理图。

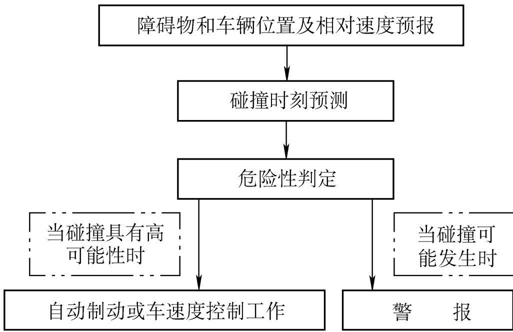



图 6-38　系统的工作原理示意图

**3. 系统的软件设计**

要想达到汽车防撞的目的，精确地测量出距离较近时两车间距离、相对速度显得

极为重要。两车不相撞的条件是：

$$\begin{cases} R \geqslant S^* \\ T \geqslant T_{\text{lim}} \end{cases}$$

式中　$R$——两车间实际距离；

$S^*$——临界安全距离，即两车不相撞的最短距离；

$T$——人的反应时间；

$T_{\text{lim}}$——最迟车间时间，即两车不相撞的警报最迟时间。

$S^*$、$T_{\text{lim}}$分别由下式确定：

$$S^* = \frac{1}{2}\left|\frac{U_S^{\ 2}}{G_S} - \frac{(U_S - U_R)^2}{G_P}\right|$$

$$T_{\text{lim}} = \frac{1}{2}\left|\frac{U_S}{G_S} - \frac{(U_S - U_R)^2}{G_P U_S}\right|$$

式中　$U_S$——本车速度；

$U_R$——两车的相对速度；

$G_P$——前车减速度；

$G_S$——本车标准减速度。

激光雷达的测距、测速公式如下：

$$R = \frac{c}{8V_{\omega_m}\omega_m} \times \frac{f_b^- + f_b^+}{2\omega}$$

$$U_R = \frac{c\ (f_b^- - f_b^+)}{4f_0}$$

式中　$c$——激光光速；

$V_{\omega_m}$——最大调制频率；

$\omega$——调制波的重复频率；

$f_b^+$——正向调制时，发射信号与接收信号的差频；

$f_b^-$——负向调制时，发射信号与接收信号的差频；

$f_0$——发射波中心频率。

由上面公式可知，软件设计任务主要是完成实时检测$f_b^-$、$f_b^+$、$U_S$，计算$U_R$、$R$、$S^*$，并比较$R$与$S^*$，根据计算与比较的结果进行危险性程度判定，即判断两车距离是否安全，并实时发出预警或险警信号。而且该系统还发出驱动车速控制器装置信号，始终使本车的车速、两车的车间距离处于最安全的状态。

### 6.5.3　汽车防撞系统的应用

汽车防撞系统适应于各种车辆，优先用于救护车、公交车、消防车、旅游车、抢险车、公务用车及出租车等。它将随着汽车工业的不断发展发挥越来越大的作用。

# 第 7 章　在节能环保方面的应用

## 7.1　太阳电池

太阳电池是指利用半导体光电效应把太阳能直接转换成电能的发电元件。

### 7.1.1　太阳电池的工作原理

太阳光照在半导体 PN 结上，形成新的空穴-电子对，在 PN 结电场的作用下，空穴由 N 区流向 P 区，电子由 P 区流向 N 区，接通电路后就形成电流。这就是光电效应太阳电池的工作原理。太阳电池如图 7-1 所示。

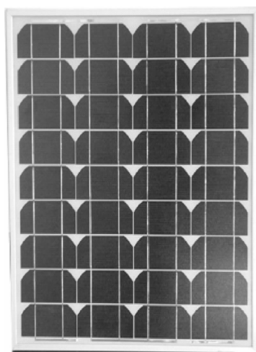


图 7-1　太阳电池

太阳能发电有两种方式，一种是光—热—电转换方式，另一种是光—电直接转换方式。

（1）光—热—电转换方式　通过利用太阳辐射产生的热能发电，一般是由太阳能集热器将所吸收的热能转换成工质的蒸汽，再驱动汽轮机发电。前一个过程是光—热转换过程；后一个过程是热—电转换过程，与普通的火力发电一样。太阳能热发电的缺点是效率很低而成本很高，估计它的投资至少要比普通火电站高 5 ~ 10 倍。

（2）光—电直接转换方式　该方式是利用光电效应，将太阳辐射能直接转换成电能，光—电转换的基本装置就是太阳电池。太阳电池是一种由于光生伏特效应而将太阳光能直接转化为电能的器件，是一个半导体光敏二极管。当太阳光照到光敏二极管上时，光敏二极管就会把太阳的光能变成电能，产生电流。当许多个电池串联或并联起来就可以成为有比较大的输出功率的太阳电池方阵了。

### 7.1.2　太阳电池的种类

太阳电池的种类如图 7-2 所示。

### 7.1.3　硅太阳电池的结构

硅太阳电池的外形及基本结构如图 7-3 所示。基本材料为 P 型单晶硅，厚度为 0.3 ~0.5mm 左右。上表面为 N+ 型区，构成一个 PN+ 结。顶区表面有栅状金属电极，硅片背面为金属底电极。上下电极分别与 N+ 区和 P 区形成欧姆接触，整个上表面还均匀覆盖着减反射膜。

当入发射光照在电池表面时，光子穿过减反射膜进入硅中，能量大于硅禁带宽度的光子在 N+ 区，PN+ 结空间电荷区和 P 区中激发出光生电子—空穴对。各区中的光生

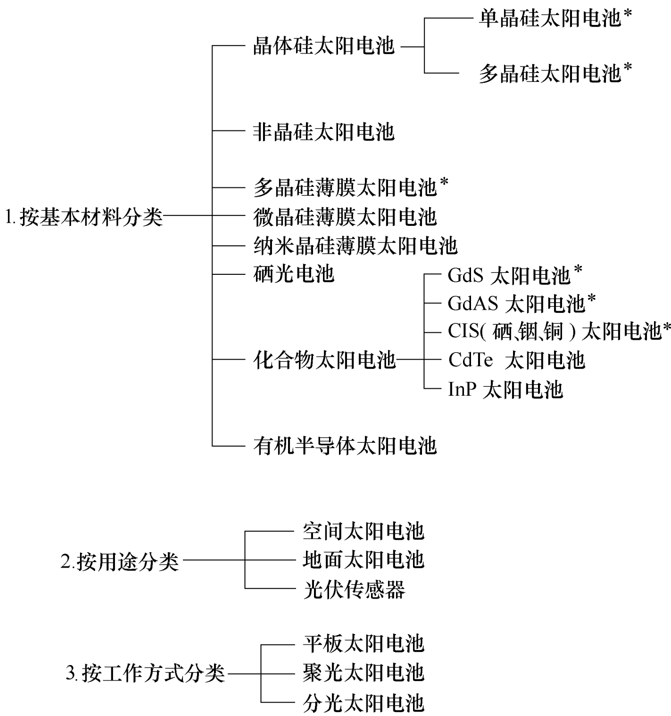



图 7-2　太阳电池的种类

注：* 者为目前主要的太阳电池

载流子如果在复合前能越过耗尽区，就对发光电压作出贡献。光生电子留于 N+ 区，光生空穴留于 P 区，在 PN+ 结的两侧形成正负电荷的积累，产生光生电压，此为光生伏打效应。当光伏电池两端接一负载后，光电池就从 P 区经负载流至 N+ 区，负载中就有功率输出。

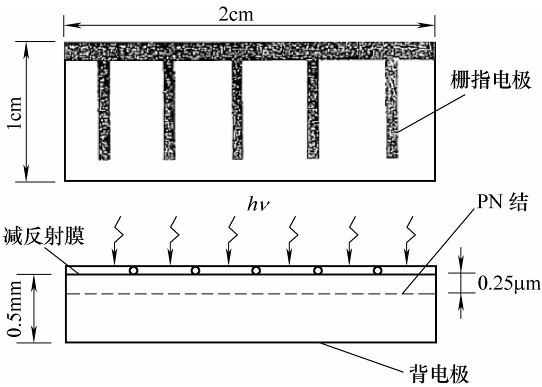



图 7-3　硅太阳电池的基本结构

太阳电池各区对不同波长光的敏感性是不同的。靠近顶区的光生电流对短波长的紫光（或紫外光）敏感，约占总光源电流的 5% ~10%（随 N+ 区厚度而变），PN+ 结空间电荷的光生电流对可见光敏感，约占 5% 左右。电池基体区域产生的光电流对红外光敏感，占 80% ~90%，是光生电流的主要组成部分。

## 7.1.4　太阳电池的制造工艺

晶体硅太阳电池的制造工艺流程如图7-4所示。提高太阳电池的转换效率和降低成本是太阳电池技术发展的主流。

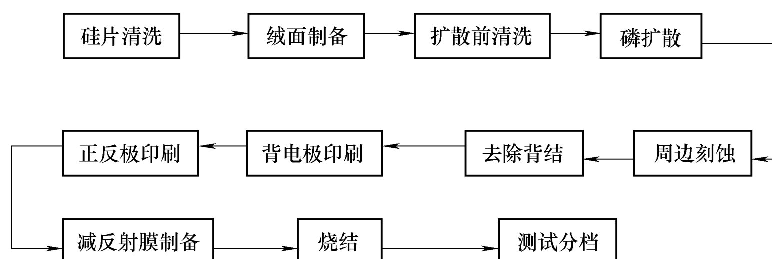



图7-4　晶体硅太阳电池的制造工艺流程

具体的制造工艺如下：

1）切片。采用多线切割，将硅棒切割成正方形的硅片。

2）清洗。用常规的硅片清洗方法清洗，然后用酸（或碱）溶液将硅片表面切割损伤层除去30~50μm。

3）制备绒面。用碱溶液对硅片进行各向异性腐蚀在硅片表面制备绒面。

4）磷扩散。采用涂布源（或液态源，或固态氮化磷片状源）进行扩散，制成PN+结，结深一般为0.3~0.5μm。

5）周边刻蚀。扩散时在硅片周边表面形成的扩散层，会使电池上下电极短路，用掩蔽湿法腐蚀或等离子干法腐蚀去除周边扩散层。

6）去除背面PN+结。常用湿法腐蚀或磨片法除去背面PN+结。

7）制作上下电极。用真空蒸镀、化学镀镍或铝浆印刷烧结等工艺。先制作下电极，然后制作上电极。铝浆印刷是大量采用的工艺方法。

8）制作减反射膜。为了减少入反射损失，要在硅片表面上覆盖一层减反射膜。制作减反射膜的材料有 $MgF_2$，$SiO_2$，$Al_2O_3$，SiO，$Si_3N_4$，$TiO_2$，$Ta_2O_5$ 等。工艺方法可用真空镀膜法、离子镀膜法，溅射法、印刷法、PECVD法或喷涂法等。

9）烧结。将电池芯片烧结于镍或铜的底板上。

10）测试分档。按规定参数规范，测试分类。

由此可见，太阳电池芯片的制造采用的工艺方法与半导体器件基本相同，生产的工艺设备也基本相同，但工艺加工精度远低于集成电路芯片的制造要求，这为太阳电池的规模生产提供了有利条件。

## 7.1.5　太阳电池的有关参数

### 1. 太阳电池的芯片尺寸

规模化生产太阳电池的芯片尺寸分别为（103mm×103mm、125mm×125mm、156mm×156mm和210mm×210mm的方片。目前的主流仍是156mm×156mm，2007年将过渡到210mm×210mm为主流芯片。最近德国已推出了代表国际最先进的210mm×

210mm 硅片全自动生产设备。

太阳电池的芯片的厚度也愈来愈薄，从 300μm→270μm→240μm→210μm→180μm，目前晶体硅片主要使用厚度为 210～240μm。

**2. 太阳电池的芯片材料及转换效率**

（1）晶体硅（单晶硅和多晶硅）太阳电池　2004 年晶体硅太阳电池占总量的 84.6%，生产技术成熟，是光伏产业的主导产品，在光伏产业中占据着统治地位。对于高效单晶硅太阳电池，国际最高转换效率为 24.7%，目前世界技术先进产品转换效率为 19%～20%。对于多晶硅太阳电池效率已突破 19.8%，技术先进产品的效率为 15%～18%。

（2）非晶体硅太阳电池　α-Si（非晶硅）太阳电池一般采用高频辉光使硅烷分解沉积而成。由于分解温度低（250～500℃），可在薄玻璃、陶瓷、不锈钢和塑料底片上沉积 1μm 厚的薄膜，且易于大面积化。非晶硅太阳电池多数采用 PIN 结构，有时还制成多层叠层式结构。

非晶硅太阳电池大量生产的大面积产品的转换效率为 10%～12%，小面积产品转换效率已提高到 14.6%，叠层结构电池的最高效率为 21%。

（3）砷化镓（GaAs）太阳电池　GaAs 太阳电池多数采用液相外延法或 MOCVD 技术制备，GaAs 太阳电池的效率可高达 29.5%，一般在 19.5% 左右。产品具有耐高温和抗辐射特点，但生产成本较高，产量受限，主要用作空间电源。以硅片为衬底，用 MOCVD 方法制造 GaAs/Si 异质结太阳电池是降低成本很有希望的方法，最高效率为 23.3%，GaAs 叠层结构的太阳电池效率接近 40%。

（4）其他化合物半导体太阳电池　这方面主要有 CIS（铜铟硒）薄膜、CdTe（碲化镉）薄膜和 InP（磷化铟）太阳电池等。这些太阳电池的结构与非晶硅电池相似。但 CIS 薄膜一般厚度为 2～3μm，已达到的转换效率为 17.7%。CdTe 薄膜很适合于制作太阳电池，其理论转换效率达 30%，目前国际先进水平转换效率为 15.8%，多用于空间方面。

### 7.1.6　提高太阳电池效率的方法

晶体硅太阳电池的理论效率为 25%（AM01.0 光谱条件下）。太阳电池的理论效率与入射光能转变成电流之前的各种可能损耗的因素有关。其中，有些因素与太阳电池的基本物理有关，有些则与材料和工艺相关。从提高太阳电池效率的原理上讲，应从以下几方面着手：

1）减少太阳电池薄膜光反射的损失。

2）降低 PN 结的正向电池。

3）PN 结的空间电荷区宽度减少，并减少空间电荷区的复合中心。

4）提高硅晶体中少数载流子寿命，即减少重金属杂质含量和其他可作为复合中心的杂质，晶体结构缺陷等。

5）当采取太阳电池硅晶体各区厚度和其他结构参数。

目前提高太阳电池效率的主要措施如下，而各项措施的采用往往引导出相应的新

的工艺技术。

1）选择长载流子寿命的高性能衬底硅晶体。

2）太阳电池芯片表面制造绒面或倒金字塔多坑表面结构。电池芯片背面制作背面镜，以降低表面反射和构成良好的隔光机制。

3）合理设计发射结结构，以收集尽可能多的光生载流子。

4）采用高性能表面钝化膜，以降低表面复合速率。

5）采用深结结构，并在金属接触处加强钝化。

6）合理的电极接触设计以达到低串联电阻等。

### 7.1.7　太阳电池的应用实例

图 7-5 是最近出现在美国德克萨斯州首府奥斯汀市盛开的 15 朵“太阳花”——向日葵造型的太阳电池板，每个都近 3.65m 高，它们白天吸收太阳能，晚上点亮 LED 照明，其余的电力将输送商用。白天望过去，这 15 块正六边形、45°仰望天空的太阳电池板，就像是搜寻外星人的天线阵列一样神秘；而到了晚上，一切又变得梦幻起来，蓝色 LED 将之打扮得熠熠生辉。在可再生能源和环保方面，这些“太阳花”作出的成绩有目共睹：每天所获得的电力，除了照明用之外，还有大概 15kW 的盈余。这些电力将输送至附近的电站，以换取维护自身运行的资金。



图 7-5　向日葵造型的太阳电池板

## 7.2　太阳能热水器

太阳能热水器是吸收太阳的辐射热能，加热冷水提供给人们在生活、生产中使用的节能设备。它不仅能以 90% 以上的效率将辐射能转换为热量，更能以近乎 100% 的效率保存热水，使用效率很高，是一种很好的节能型绿色产品。按照人均使用太阳能热水器面积，日本有 20% 家庭使用太阳能热水器，以色列有 80% 的家庭使用太阳能热水器。我国太阳能热水器的用户比例较低。

每平方米平板太阳能集热器平均每个正常日照日，可产生相当于 2.5kW · h 电的热量，每年可节约标准煤 250kg 左右，可以减少超过 700kg $CO_2$ 的排放量。太阳能热水器的广泛运用，包括生活用热水、采暖、空调，在省钱的同时必将极大地改善地球的污染状况。

### 7.2.1　太阳能热水器组成

如图 7-6 所示的太阳能热水器是由保温水箱、真空集热管、支架及连接管道四部分组成。太阳能热水器便是太阳能成果应用中的一大产业，它为百姓提供环保、安全节能、卫生的新型热水器产品。

保温水箱是储存热水的容器。因为太阳能热水器只能白天工作，而人们一般在晚上才使用热水，所以必须通过保温水箱把集热器在白天产出的热水储存起来，容积是每天晚上用热水量的总和。其用材料强度和耐腐蚀性至关重要，优质的选材应是厚度在 0.6 ~ 0.8mm 之间的不锈钢板，采用氩气保护，高频自动焊接，提高钢板在各种水质或各种环境耐腐蚀性能。




图 7-6　太阳能热水器结构

集热器是系统的集热元件。其功能相当于电热水器中的电热管。和电热水器、燃气热水器不同的是，太阳能集热器利用的是太阳的辐射热量，故而加热时间只能在有太阳照射的白昼。

支架应强度高，外观美观。

连接管道将热水从集热器输送到保温水箱，并将冷水从保温水箱输送到集热器的通道，使整套系统形成一个闭合的环路。设计合理、连接正确的循环管道对太阳能系统是否能达到最佳工作状态至关重要。热水管道必须做保温处理。

### 7.2.2　太阳能热水器的工作原理

太阳能热水器的工作原理如图 7-7 所示。冷水通过管道进入太阳能热水器内，经过集热板，集热板能收集太阳能，将太阳能转化为热能，然后把冷水加热。由于冷水的比重比热水的比重大，热水会自动往上升，然后形成一个循环动力，水就在集热板那

逐渐升温，达到一定温度后就能进入储热水箱，需要热水的时候就能供应热水。这里面包括了两个原理：

1）水循环原理。就是水会自动流动，这是利用冷水比热水密度大，冷水下沉，热水上升，形成自然对流循环，使水箱中的水逐渐变热，达到设定的水温为止。当太阳强度不足以满足循环需要的时候，可以在水循环闭路加一水泵，实现强制循环。

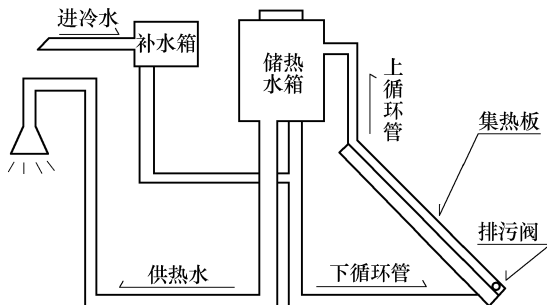



图 7-7　太阳能热水器工作原理图

2）集热器吸热原理。太阳能热水器的集热器表面，有一特殊的涂层，此涂层对太阳能可见光范围具有很大的吸收率，吸收加热以后，集热器的散热热辐射波长在长波范围，该涂层对长波的发射率很低，这样就有效地保留了太阳能的热量，再通过这种热量将冷水逐渐加热为热水。

集热器上的集热管实际像一个被拉长的热水壶内胆，由一大一小两支玻璃管套合而成，外层透明，内层为涂有光普选择性的吸收涂层，内外管之间抽成直空，它是太阳能热水器的核心，用于最大限度地吸收太阳光辐射后的热能；由于真空玻璃管是圆形的，具有对太阳光源自然跟踪的特点，再加上反光板的反射原理，使玻璃管四面受光面面俱到，集热效果时间更长，水温更高，即使在高寒地区一年四季也可正常运行。

## 7.2.3　太阳能热水器的分类

### 1. 按集热器分类

太阳能热水器分为金属平板式、真空玻璃管式、U 型管式、热管式和空气式。应根据当地气候特点及安装要求来选择适当的集热器。

金属平板式集热器是在传热性能极佳的金属片上，覆盖上吸热涂层，利用金属的传热性，将吸收的热量传于水箱中，其外观美观，安装方便，可以做成平板，而且不容易损坏，但保温成本较高。真空玻璃管吸热效率较高，不需要在集热部分在增加保温层，而且现在的真空玻璃管在抗高温、抗打击和保温上性能都很好，目前为绝大部分太阳能热水器生产厂家所采用，但体积较庞大，管中容易集结水垢。热管式集热器能抗 －40℃低温，而平板式、真空管式都无法抵抗如此低温，适用于天气寒冷地区，但热管式的造价高昂。U 型管式集热器可承压、产水温度高且无安全隐患，系统稳定性好，适合于工业用途的较高温度热水（70～90℃），价格也比热管式低。空气式集热器可以直接使用，接到家庭用热水，效率高，无漏水现象，但要与房屋一起设计。

### 2. 按结构分类

太阳能热水器可以分为普通式太阳能热水器和分体式热水器。普通式太阳能热水器将真空玻璃管直接插入水箱中，利用加热水的循环，使得水箱中的水温升高，这是目前厂家都采用的，此类热水器只有顶层能用。分体式热水器是为了解决非顶层用户使用太阳能热水器。分体式的循环有两种，一种是靠水的自然循环，这种热水器热交

换效率很低，远远不能满足用水要求；另一种是靠泵循环热交换，这解决了自然循环效率低的问题，还可以明显改善水的热交换。

**3. 按水箱受压分类**

太阳能热水器分可以分为承压式太阳能热水器和非承压式太阳能热水器。目前，无论是哪一种分体式热水器，都必须使用承压式水箱，承压水箱虽然解决了水的循环问题和使用水时的方便，但由于要考虑集热部分的密封性能及安全性问题，一般要求耐压为 709.275kPa，制造成本高，而且循环效果不是很理想。目前装在屋顶的普通太阳能热水器都属于非承压式热水器，它的水箱有一根管子与大气相通，是利用屋顶和用户家里的高度落差，使用水时产生压力。其安全性、成本、使用寿命都比承压式要显著得多。

## 7.2.4　太阳能热水器控制器

太阳能热水器控制器对储水箱水位、水温等进行检测和显示。水位过低时进行自动上水，水满自停，防止溢水。在无光照阴雨天或寒冷季节进行辅助电加热，且温度可由用户预置。在寒冷的冬季能对上水管道的水进行排空，防止管道冻裂。具有防漏电、防干烧等多种安全保护和声光报警功能。

**1. 太阳能热水器控制器系统结构**

太阳能热水器辅制系统结构如图 7-8 所示。在真空管太阳能热水器的保温储水箱内增加一个与电热水器类似的电热元件并固定在绝缘底座上，引出交流电源线入户，由辅助控制系统的继电器控制通断电。水位、水温探测器从保温储水箱顶部安装在水箱中，通过电缆线接入用户室内控制器。进行管道排空时，由控制系统关闭排空控制阀，打开热水开关和淋浴开关，将管道中的水放掉；用水时则打开排空控制阀。系统自动上水时，通过单项电磁阀上水。水流电开关用于检测淋浴开关是否打开、是否有水的流动。当淋浴开关打开用水时，系统自动停止上水、切断辅助电加热器的电源。

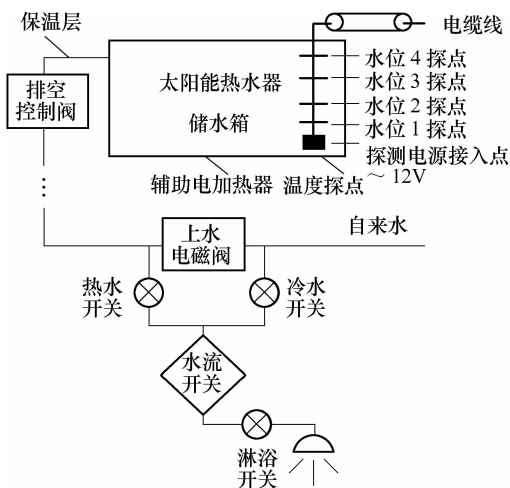



图 7-8　太阳能热水器控制器系统

**2. 控制系统组成**

太阳能热水器控制系统的组成如图 7-9 所示。系统采用 AT89C51 单片机对水温、水位等参数进行智能检测和显示，读取水流开关、排空阀门的状态，经键盘操作和单片机内部运算比较，控制相应的执行机构进行通、断电；进行防漏电、防干烧等保护，并进行相应的声光报警。

采用 DALLAS 公司生产的 DS18B20 一线式数字温度传感器检测水箱的水温信号，它具有 3 引脚 TO-92 小体积封装形式，CPU 只需一根端口线就能与 DS18B20 通信控制

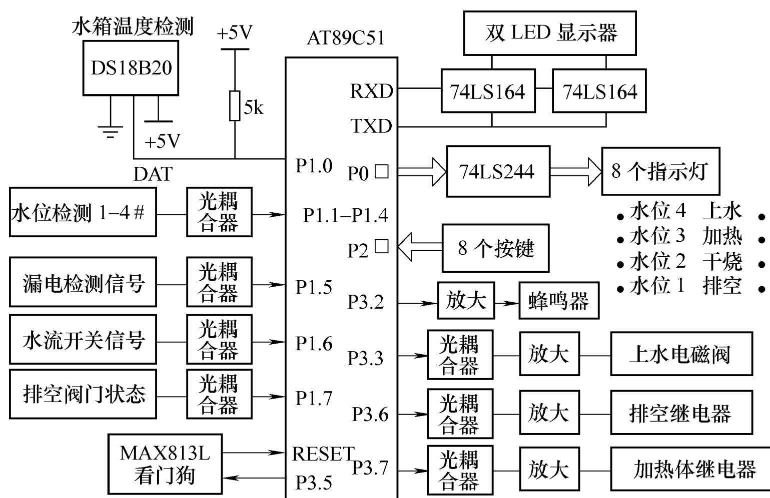



图 7-9　太阳能热水器控制系统的组成

读取温度值。水流开关信号的检测采用开关式传感器，其内部是一个霍尔开关，排空阀是一个带行程开关的球型阀，由 5W 交流伺服电动机带动，每旋转 90°输出一个开关信号，排空阀的开闭状态对应于该开关信号。上水电磁阀采用 12V 直流单项电磁阀；辅助电加热体的通断电采用继电器控制；排空阀由 36V（5W）交流伺服电动机带动，由排空阀的开闭状态信号确定并通过继电器控制交流伺服电动机电源通断电。

**3. 控制软件设计**

主程序和子程序流程图分别如图 7-10 和图 7-11 所示。主程序首先完成串行口、定时器、中断源的初始化，设置初始运行参数、开中断，然后循环读取键盘状态，检测系统是否漏电。一旦检测到系统漏电，进行声音和显示报警，将所有执行机构断电；若系统不漏电则根据存储的键盘状态和检测的水温、水位等状态信号进行相应的处理并等待中断服务程序的执行。系统正常控制时，首先显示水温和水位，若检测到水流开关打开用水时，自动断开上水阀和电加热体电源，即实现水电联动，用水停电。当检测到水位过低时打开电磁阀上水；到达最高水位后，自动关闭电磁阀。在水位超过第二档时，将检测的实际水温与设置水温进行比较，若实际水温低于设置水温，则加热体通电进行辅助电加热；若实际水温高于设置水温时，切断加热体电源；若检测到水位低于第二档，不论设置温度高低，总是停止加热，以防止加热体干烧。

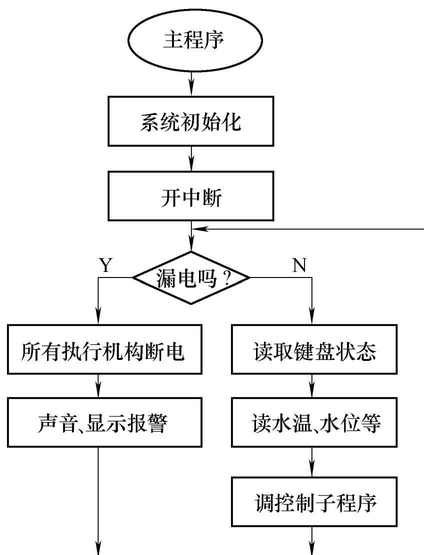



图 7-10　控制主程序流程

控制子程序
显示水温、水位
水流开关打开吗？
Y
N
水位低于第一档吗？
Y
N
关闭电磁阀
水位低于第二档吗？
Y
N
打开排空阀
加热体断电
水位低于第四档吗？
Y
N
关闭电磁阀
打开上水电磁阀
实际温度大于预置值85℃吗？
Y
N
加热体断电
加热体断电
加热体通电
声音报警
程序返回

图 7-11　控制子程序流程图

## 7.3　光电幕墙

太阳能是一种取之不尽、用之不竭的能源。为了把太阳能无污染地转换成可利用能源，光电幕墙技术应运而生。光电幕墙（屋顶）是将传统幕墙（屋顶）与光生伏打效应（光电原理）相结合的一种新型建筑幕墙（屋顶），如图 7-12 所示。这种新兴的技术，将光电技术与幕墙系统技术科学地结合在一起。光电幕墙除了具有普通幕墙的性能外，最大的特点是具有将光能转化为电能的功能。太阳电池利用太阳光的光子能量，使得被照射的电解液或者半导体材料的电子移动，从而产生电压。

图 7-12　光伏玻璃幕墙一体化（光电幕墙）

### 7.3.1　概述

早在 100 多年前，人们就发明了光电模板，即利用光照使浸入电解液的锌电板产生电流。到了 1954 年，美国研究人员使用元素硅取得巨大成功。光电模板首先被用在宇宙航行上。现在人们越来越关注健康，绿色环境意识日益增强，科技发展进步已将光电模板装入幕墙中变为可能。

随着常规发电成本的上升和人们对环境保护的日益重视，一些国家纷纷实施、推广太阳能屋顶计划，并提出了“建筑物产生能源”的新概念，由此推动了光电技术的大规模开发与应用。美国、日本、德国、意大利、印度等许多国家都已建有太阳能屋顶或外墙的建筑。在 1991 年慕尼黑最大的建筑行业展览会上，德国的旭格公司首先展出了光电幕墙，这是将光能应用于建筑装饰业的开始，引起了专业人士的关注。

建筑物是高能耗的代名词，占全部能耗领域 1/3 以上，如何降低建筑物能耗成为节能减排和可再生能源利用的重要课题。我国的建筑幕墙由 20 世纪 90 年代年产量 500 万 ~600 万 $m^2$，迅速增长到现在的 5000 万 ~6000 万 $m^2$，而且目前还在以 10% ~20% 速度增长，如果我国能够在这个数量基础上推广使用 10% 左右光电幕墙，全国每年大约将有 500 万 ~600 万 $m^2$ 光电幕墙产生，年产电能约 50 亿 ~70 亿 kW，相当于 5 ~10 座中型火力发电站，可以减排 $CO_2$ 约 30 万 t。同时，在建筑幕墙上推广太阳能发电不但充分利用了建筑的竖向空间，而且不需要占用额外的建筑面积，节约了昂贵的土地资源。

所谓光伏建筑一体化是指太阳电池成为建筑本身的一部分，如屋顶瓦、幕墙、门窗、遮阳篷等。光电幕墙是一种集发电、隔声、隔热、安全、装饰功能于一身的新型建材。太阳能光电幕墙集合了光伏发电技术和幕墙技术，充分利用建筑物的表面和空间，把传统幕墙试图屏蔽在建筑物外的太阳能转化成对人们有益的电能，最大特点是具有通风换气、环保、节能的功能，节省了能源消耗，降低了环境污染，同时为现代建筑提供一种新的美学装饰效果，是一种高科技产品，代表着国际上建筑光伏一体化的最新发展方向。目前，光伏建筑一体化已经成为国际发展主流方向，太阳电池成为最具美感的建筑材料之一。

### 7.3.2　光电幕墙的原理及结构特点

光电幕墙结构示意图如图 7-13 所示。光电幕墙用特殊的树脂将太阳电池粘帖在玻璃上，镶嵌于两片玻璃之间，利用光伏效应（PV），通过光电池原理将太阳能转化为电能。幕墙面板为镶嵌有光伏电池模块的夹胶玻璃，各模块与逆变器连接组成太阳能发电系统。设计光电幕墙需考虑电池、模板、导线和变压器各个因素，各电池组成光电模板，各模板组成小分格，并通过导线连接，所有导线又组成一个 PV 变压器。一个 PV 变压器是一个封闭的幕墙部分，每套光电设备可由一个或多个变压器组成。每套光电设备都先产生直流电，再由直流电转变成交流电，并由电压网传输，逆整流器再将 230/400V 的电压转变成频率通常为 50Hz 的电能。

由于太阳电池片大多是由晶硅组成，而晶硅分为单晶硅、多晶硅和非晶硅。单晶

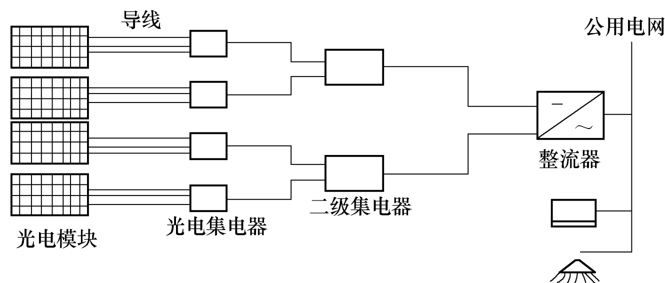



图 7-13　光电幕墙结构示意图

硅呈现黑色，多晶硅呈现浅蓝色，光能透过率为 12% ~14%；非晶硅完全不透明，或者半透明，透 12% 的光，呈现颜色为深棕红色的光，光能利用率只有 45%。由于要保证一定的天然采光，所以应该选择多晶硅或半透明非晶硅电池，或者留出一部分透光面积。半透明非晶硅光伏组件的透光率为 30% 左右，既可作为窗户采光用，又可用于发电。

多个太阳电池通过导线相互连通，并被接在大表面的模板上。这些电池经加固处理后被嵌入特殊的透明度极高的坚硬的低铁树脂玻璃中，导线可接在模板背面或玻璃边缘，从而构成了一个整体的光电板。光电板的尺寸规格可以根据实际工程的幕墙分格方案进行量体定型制作。

## 7.3.3　光电幕墙的组成

光电幕墙的基本单元为光电板，而光电板是由若干个太阳电池进行串、并联组合而成的电池阵列，把光电板安装在建筑幕墙相应的结构上就组成了光电幕墙。

多个太阳电池经加固处理，镶嵌在特殊的透明度极高的低铁玻璃中，彼此之间经过其背面的导线相连，从而构成了一个整体的光电板。光电板的尺寸规格可以根据实际工程的幕墙分格方案进行量体定型制作。在阳光照射下，光电板产生直流电，所有光电极产生的电能，通过多极集成电路整流、变压等过程，转化成供使用的交流电，送入用户电网。此幕墙体现了智能化特点，把太阳能光电技术集成到幕墙中，不占有建筑面积，且太阳能光电板优美的外观，具有特殊的装饰效果，更赋予建筑物鲜明的现代科技色彩。

**1. 光电板基本结构**

其上层一般为 4mm 白色玻璃，中层为光伏电池组成光伏电池阵列，下层为 4mm 的玻璃，其颜色可任意。上下两层和中层之间一般用铸膜树脂（EVA）热固而成，光电电池阵列被夹在高度透明、经加固处理的玻璃中，在背面是接线盒和导线。模板尺寸为 500mm×500mm~2100mm×3500mm。从接线盒中穿出导线一般有两种构造：照片所显示的构造是从接线盒穿出的导线在施工现场直接与电源插头相连，这种结构比较适合于表面不通透的建筑物，因为仅外片玻璃是透明的；照片所显示的构造是导线从装置的边缘穿出，那样导线就隐藏在框架之间，这种结构比较适合于透明的外立面，从室内可以看见此装置。

**2. 光电幕墙的基本结构**

光电模板安装在建筑幕墙的结构上则组成光电幕墙，一般情况下，建筑幕墙的立柱和横梁都是采用断热铝型材，除了要满足 JGJ102—2003 规范和 JG3035—1996 标准要求之外，刚度一般高一些为好，同时，光电模板要能够便于更换。

**3. 光电幕墙光电面积设计计算**

光学幕墙结构设计可按照玻璃工程技术规范（JGJ102—2003）、建筑玻璃应用技术规程（JGJ113—2003）等有关标准和规范进行。光电幕墙电学结构一般采用单路自然能——单蓄电池结构。

光电幕墙所产生的电能，经过输入电能变换器，转换成能蓄电池组要求的充电电压和充电电流，向蓄电池充电，蓄电池容量按用户要求的无太阳天气连续供电天数进行设计；输出电能变换器，将蓄电池组中的直流电能转换成负载要求的电压和电流及电能形式，向负载供电。有些国家由于光电幕墙发出电量，经过逆变器后可并入电网，可以不设蓄电池组。我国目前还做不到这一点，所以建议采用电池组。在阴雨天气或太阳光少的情况下，也能保证一段时间的连续供电。由于输入电能变换器和输出电能变换器互相独立，其设计更为容易，光能的波动对供电质量几乎没有影响。

### 7.3.4　光电幕墙的特点

太阳能光电幕墙集合了光伏发电技术和幕墙技术，是一种高科技产品，集发电、隔声、隔热、安全、装饰功能于一身的新型建材，特别是太阳电池发电不会排放二氧化碳或产生对温室效应有害的气体，也无噪声，是一种净能源，与环境有很好的相容性。但因价格比较昂贵，光电幕墙现多用于标志性建筑的屋顶和外墙。充分体现了建筑的智能化与人性化特点，代表着国际上建筑光伏一体化技术的最新发展方向。

1）节约能源。由于光电幕墙作为建筑物外围护体系，并直接吸收太阳能，避免了墙面温度和屋顶温度过高，可以有效降低墙面及屋面温升，减轻空调负荷，降低空调能耗。

2）保护环境。光电幕墙通过太阳能进行发电，它不需燃料，不产生废气，无余热，无废渣，无噪声污染。

3）新型实用。舒缓白天用电高峰期电力需求，解决电力紧张地区及无电少电地区供电情况。可原地发电、原地使用，减少电流运输过程的费用和能耗；同时避免了放置光电阵板的额外占用宝贵的建筑空间，与建筑结构合一省去了单独为光电设备提供的支撑结构，也节约了昂贵的外装饰材料，减少建筑物的整体造价。

4）特殊效果。光电幕墙本身具有很强的装饰效果。玻璃中间采用各种光伏组件，色彩多样，使建筑具有丰富的艺术表现力。同时光电模板背面还可以衬以设计师喜欢的颜色，以适应不同的建筑风格。

### 7.3.5　光电幕墙的应用实例

2008 年 12 月，全球最大的光伏建筑一体化低能耗生态建筑——无锡新区尚德电力总部办公大楼竣工，如图 7-14 所示。总面积约 1.8 万 $m^2$ 的全球最大光电幕墙成为这一

生态建筑的标志，总投资约 2 亿元人民币。此建筑为地上 7 层，幕墙总高度达 37m，光电幕墙面积有 $6900m^2$，是目前全球最大的光电幕墙。该大楼在我国建筑领域里首次引进“低能耗”、“功能型”、“生态化”概念，整个大楼使用光伏玻璃幕墙等太阳能光伏建筑一体化材料，通过光电效应将太阳能转化为电能。整个工程设计容量为 1MW，预计全年发电量将超过 100 万 kW · h。据统计，整个建筑以最低使用寿命 70 年计算，共可产生电量 3892 万 kW · h，预计每年可替代标准煤 338t，减排二氧化碳 605t，对缓解峰电压力起到很大的作用。大楼采用多晶硅太阳电池幕墙组件作为光电转换装置和光伏建筑一体化系统，除保证自身建筑用电外，还可以向电网供电，从而缓解高峰电力需求。




图 7-14　全球最大光伏建筑一体化建筑——尚德电力总部大楼

图 7-15 所示为柏林火车站房，光电屋顶做在两个弧形部分，深色部分就是光电池。总面积为 $3311m^2$，总装机容量为 325kWp。



图 7-15　柏林火车站光电屋顶

图 7-16 为国内某工程侧立面非晶硅明框光电幕墙。图 7-17 为辉煌净雅酒店外墙的动态夜景。图 7-18 为 LED 多媒体动态天幕结构。图 7-19 ~ 图 7-25 为国外建筑上的光电幕墙的应用实例。

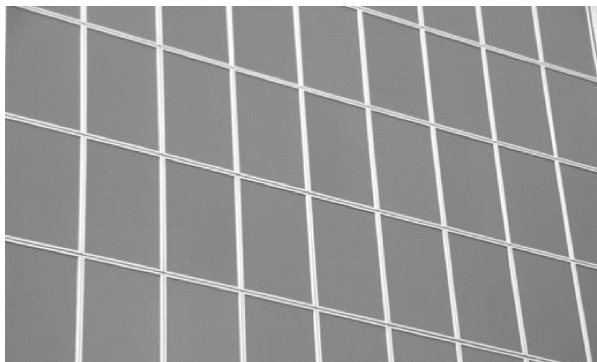


图 7-16　国内某工程侧立面非晶硅明框光电幕墙放大图

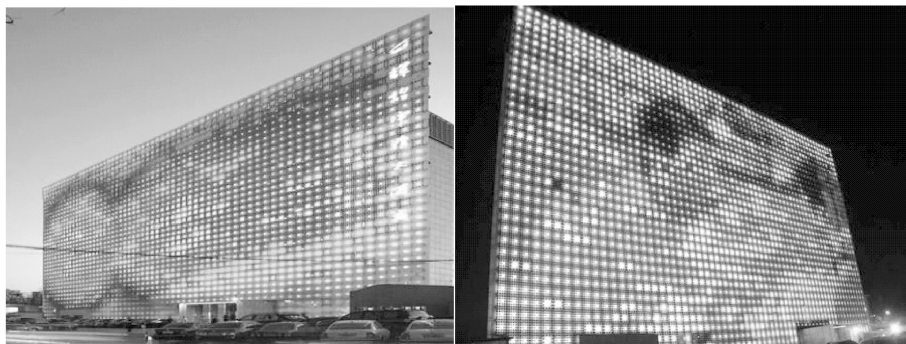


图 7-17　辉煌净雅酒店动态夜景



图 7-18　LED 多媒体动态天幕结构



图 7-19　装饰性光伏屋顶（荷兰）



图 7-20　外强装饰 21kW（意大利）



图 7-21　光伏走廊 10kW（德国）



图 7-22　光伏幕墙 73kW（英国）



图 7-23　光伏幕墙 10kW（德国）



图 7-24　光伏幕墙 9kW（德国）与光热幕墙 100kW（德国）



图 7-25 遮阳挡雨 14.2kW（德国）

## 7.4 风光互补发电系统

我国具有丰富的太阳能、风能资源，并已经应用于许多领域。但不可回避的是不论是太阳能还是风能，它们的能量密度都非常低，独立的太阳能和风能供电系统都不能提供可靠的电能供应。利用风能和太阳能之间很好的互补性能，将太阳电池组件与风力发电机有机地配组成一个系统，可充分发挥各自的特性和优势，最大限度地利用好大自然赐予的风能和太阳能。在白天，日照强度高、风小，而晚上风大，这一特性可以使独立的太阳能和风能结合起来组成风光互补混合供电系统，提高了供电系统的可靠性。

风光互补发电系统是一种将太阳能和风能转化为电能的装置。该系统无空气污染、无噪声、不产生废弃物。

### 7.4.1 风光互补发电系统的组成

风光互补系统主要由太阳能光伏组件、风机、控制器、蓄电池组、逆变器等部件组成。风光互补发电系统如图 7-26 所示。由于太阳能与风能的互补性强，风光互补发电系统在资源上弥补了风电和光电独立系统在资源上的缺陷。同时，风电和光电系统在蓄电池组和逆变环节是可以通用的，所以风光互补发电系统的造价可以降低，系统成本趋于合理。

不论是风力发电系统还是太阳能光伏发电系统，或是风光互补发电系统，而不论系统输出功率大或小，充放电控制器或直流—交流逆变器均是系统中必不可少的重要配置。图 7-27 为某公司研制的 NWP 型风光互补多功能控制逆变电源工作原理图，它采用先进的 PWM 脉宽调新体制，将控制功能与逆变功能有机地合二为一，适用于风力发

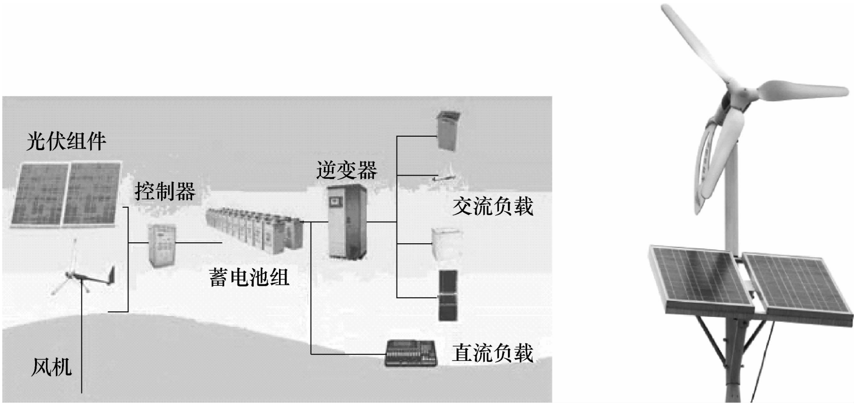



图 7-26　风光互补发电系统组成示意图

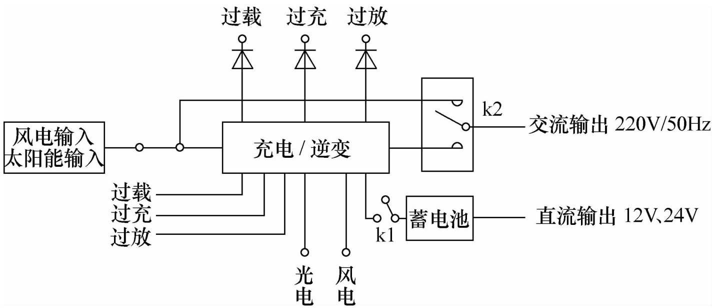



图 7-27　多功能控制逆变电源工作原理图

电系统、太阳能光伏发电系统和风光互补发电系统，适用范围广泛。具有输出电压稳定、运行可靠、多种指示和自动保护功能、操作简便等特点。表 7-1 为风光互补多功能控制逆变电源技术指标。

**表 7-1　NWP 型风光互补多功能控制逆变电源技术指标**

| 规格/性能指标 | | NWP150 | NWP300 | NWP500 | NWP1000 | NWP2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 直流输入 | 额定电压/V | 12 | 24 | 24 | 48 | 48 |
| | 输入直流电压允许范围/V | | 10.5～13.5 | 21～27 | | 42～54 |
| 交流输出 | 输出额定功率/W | 150 | 300 | 500 | 1000 | 2000 |
| | 输出额定电压及频率 | 220（1±10%）V，（50±1）Hz， | | | 220（1±5%）V，（50±0.01）Hz | |
| | 动态响应（负载 0～100%） | 5% | | | 8% | |
| | 功率因素（PF） | 0.8 | | | | |
| | 过载能力（%） | 150 | | | | |
| | 峰值系数 | 3∶1 | | | | |

（续）

| 规格/性能指标 | | NWP150 | NWP300 | NWP500 | NWP1000 | NWP2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 交流输出 | 逆变效率（80%阻性负载）（%） | 85 | | | | |
| | 主电路结构方式 | 推挽电器 | | | | |
| | 控制方式 | 专用集成电路 | | | | |
| 工作环境 | 绝缘强度/V（交流输出与输入） | 1500 | | | | |
| | 噪声（1M）/dB | <65 | | | | |
| | 使用环境温度/℃ | -10~50 | | | | |
| | 温度/℃ | 0~90 不结露 | | | | |
| 保护功能 | | 输入接反保护、输入欠电压保护、输入过电压保护、输出过载保护、输入短路保护 | | | | |

## 7.4.2　风光互补发电系统的实际应用

1）应用于日用产品。如风光互补路灯照明系统（见图 7-28）、风光互补供暖供电、风光互补充电电源、风光互补发电的自行车（见图 7-29）、风光互补野营灯和独立电源等。



图 7-28　风光互补路灯发电系统




图 7-29　风光互补发电的自行车

2）应用于建筑行业。北京奥运会已经将风力发电机和太阳能集热管安装进了奥运村，风光互补系统还用于光伏一体化建筑（BIPV）、屋顶风力发电机和风光互补锅炉等。

3）并网发电。在发达国家，光伏产品的 80% 用于并网发电，而我国几乎为零，未

来风能和太阳能发电的大规模并网势在必行。$1km^2$ 的沙漠可装 100MW 光伏，若将 1% 的中国沙漠装上光伏，总容量将达到 13.1 亿 kW，而截至 2007 年底我国总的装机容量不过 7.13 亿 kW。所以，未来我国可再生能源发展具有广阔的发展前景。

### 7.4.3　风光互补发电系统的优点

1）适应性强、适应范围广。风光互补发电系统可弥补独立发电不足，解决单一能源利用受时间性和区域复杂性的限制，风光互补系统能全天候工作。

2）环保、绿色、无污染。风光互补新能源，完全利用自然的能量，造福于人类。其绿色、环保、可再生已成为国家乃至世界大力提倡使用的能源。

3）一次性投入、无限制产出。风光互补新能源，因其前期一次性成本投入，能达到后期 15～20 年的无条件产出，经济价值可观。

4）风光互补，提高蓄电池的使用寿命。风光互补新能源，由于在自然条件满足的情况下，能 24h 稳定正常工作，能充分保证充电的稳定性，从而提高蓄电池的使用寿命。

5）性能稳定、实用美观。风光互补新能源，形式多样化，用于不同的类型都有其独特的设计、开发、综合的模式。不仅达到性能稳定，而且更增添了实用美观的效果。

## 7.5　变频空调

变频空调是由电脑控制的变频器来调节变频压缩机运转的快慢来调节温度。供电频率高，压缩机转速快，空调器制冷量就大；当供电频率较低时，空调的制冷量就小，但避免了普通空调时停时转、温度不均的现象。变频调速调速范围大，电动机运转平稳，可实现无级调速。变频空调的最大优点是省电，与普通空调相比，可节约电费 20%～30%。其次，变频空调启动电流小，仅为普通空调的 1/7。可以解决因家庭电表小，启动时易跳闸的困扰。

### 7.5.1　变频空调的工作原理

电动机的空转转速是由电动机定子的磁极对数、电动机电源的电压和电源的频率所共同决定的，空转速度的高低决定了相同负载情况电动机的转速。通常使用的电动机是靠改变电动机电压的办法来改变电动机的转速，而频率是不能变化的。而变频空调采用了变频装置，该装置可以改变电源的频率来改变电动机的转速，电动机电源的频率越低，电动机的转速就会越慢。

变频装置的工作原理如图 7-30 所示。家用的 50Hz 交流电首先送到整流用的晶闸管。交流电经过晶闸管后变成直流电，然后直流电送入逆变器中，逆变器的开关和正负极的变化由一个脉冲发生器的装置控制，这样从逆变器出来的电，再通过滤波等环节，就变成了不同频率的交流电，频率的大小由脉冲发生器控制。经过改变频率的交流电送入带动压缩机的电动机，就可以控制电动机的转速了。

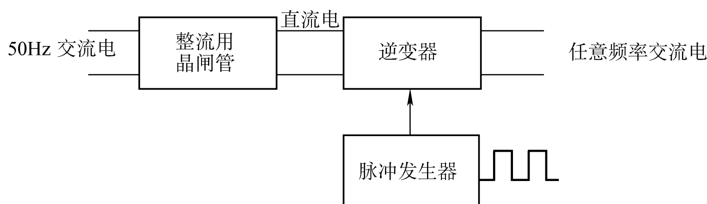



图 7-30　变频空调工作原理

## 7.5.2　变频空调的类型

变频空调器的类型主要由变频方式和主要零部件压缩机、节流机构、室内风扇电动机、室外风扇电动机来决定的。因此，不同的变频方式和零部件也就组成了不同类型的变频空调器，这种组合可以多达十几种，在这众多的组合中基本上可以分为三种类型。

第一类变频空调器采用交流变频，制冷剂流量调节方式采用毛细管，压缩机采用单转子交流变频压缩机。这种空调器基本能体现变频空调器各种优点，而且可靠性好，缺点是节能效果较差，噪声和振动也较大，属过渡产品。

第二类变频空调器同样也是采用交流变频，不同的是压缩机采用双转子交流变频压缩机，制冷剂流量调节方式采用电子膨胀阀。此类空调器变频范围更宽，噪声和振动有所降低，节能效果明显。

第三类是直流变频空调器，采用直流变频压缩机和直流风扇电动机，调节方式是电子膨胀阀。此类空调器节能效果更好，噪声和振动达到了最低的水平，同时还没有交流变频的电磁干扰，是当前最先进的变频空调器。

## 7.5.3　变频空调的系统构成

**1. 制冷系统**

变频空调器采用由变频压缩机、电子膨胀阀、室内外换热器和风机系统构成的可变容量制冷系统，该系统主要完成三大调节功能，即压缩机功率调节、制冷剂流量调节和热交换器能力的调节。其中压缩机功率调节由变频器完成，制冷剂流量则由电子膨胀阀调节，而热交换能力则由风扇调节。

空调器制冷系统由压缩机、冷凝器、过滤器、毛细管和蒸发器组成。这些部件通过连接管组成一个封闭的系统，在系统内注有一定量的制冷剂。制冷剂在封闭的系统中循环。图 7-31 是制冷系统的工作过程图。制冷剂在蒸发器中处于低压液态的状态，在室内温度高时，制冷剂吸收室内热量不断汽化，变成高温气态。气态的制冷剂经过压缩机，压缩机将制冷剂压缩成高压高温的气体，然后送入室外的冷凝器，在冷凝器中制冷剂由于处于高温高压下，与外界交换热量，同时制冷剂液化，温度降低。液化后的制冷剂通过毛细管后温度进一步降低，形成低温液态的制冷剂，又进入蒸发器进行下一个循环。不断地循环往复，室内的热量就会被排到室外。

**2. 控制系统**

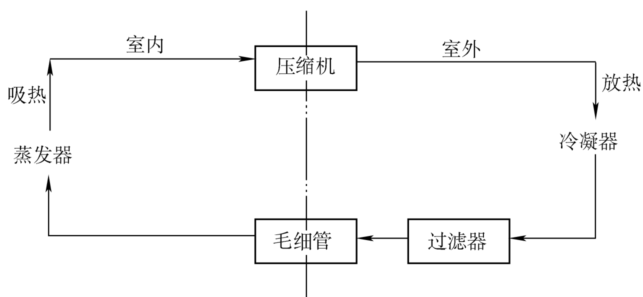



图 7-31　空调制冷系统的工作过程图

变频空调的模糊控制器的基本结构如图 7-32 所示，它可分为模糊输入接口、模糊推理判别决策机构和模糊输出接口三个部分。

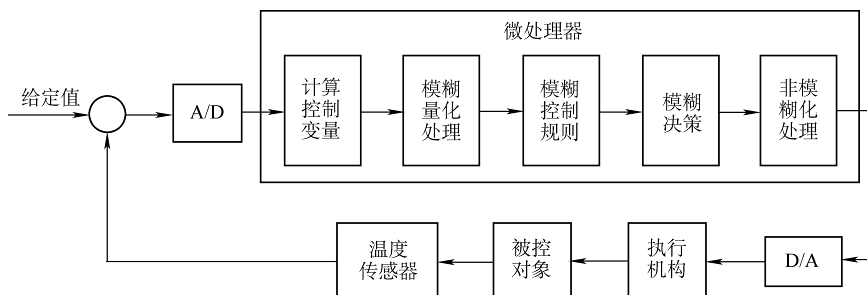



图 7-32　模糊控制器的基本结构

模糊输入接口的主要功能是根据本次采样得到的系统输出值，计算所选择的系统的输入变量，并将输入变量的精确值变为模糊量，即将被控系统的温差及温差变化率的精确值转化为模糊量，以便进行模糊推理和决策。

模糊输出接口的主要功能是把经模糊推理决策后所得的模糊控制量转化为精确量，去控制压缩机的转速。

变频空调器采用模糊控制技术对输入变量作模糊技术处理后，可实现对多变量的动态控制，其控制关系如图 7-33 所示。它包括三个输入量：室内温差及其随时间的变

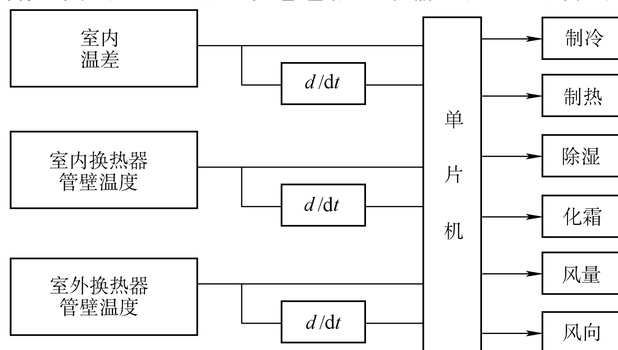



图 7-33　变频空调器的模糊控制关系

化率，室内换热器管壁的温度及其随时间的变化率，室外换热器管壁的温度及其随时间的变化率。输出量包括对空调器的制冷、制热、除湿、化霜、风向、风量等功能实行智能化控制。

### 7.5.4　变频空调的特点

1）控温精确。定速空调利用开停机来调节房间温度，控温范围为 ±2℃左右，温度波动范围大，人体感觉不舒服，易得“空调病”。变频空调在刚开机时以高速运转，当房间温度达到设定温度后转为低频工作，温度控制精确，控温范围 ±0.5℃，人体感觉舒服。

2）制冷制热速度快、效果好。变频空调刚起动时以最大频率运转，一般在 130Hz 以上工作，制冷制热十分强劲，几分钟内就可达到设定温度，而定速空调一般要半个小时左右。

3）节能省电。变频空调开机后半小时之内就转入节能运行，夜间使用有节电功能，而且在低频运转时能效比更高。相关资料表明，使用相同功率的变频空调 2～3 年可收回与定频空调的差价。目前我国空调市场保有率为 8000 台，变频空调约占 8%。据专家统计：家用空调年耗量为 400 亿 kW · h 以上，如果选择可节能 1/3 的变频空调，每年可节电 120 亿 kW · h，折合人民币 50 亿元。

4）超低温起动。定速空调在室外温度 -8℃以下基本就不能工作了，而变频空调在 -15℃下仍能制热。

5）运行更稳定，寿命更长久。定速空调靠开、停机来控制房间温度，频繁地开、停会对系统、设备造成冲击，工作不稳定，压缩机寿命短，普通空调一般为 8～12 年；而变频空调利用低频运行来控温，开、停不频繁，压缩机和空调系统运行稳定，使用寿命长，一般为 12～15 年。

6）开机软启动，安全可靠。定速空调开机时启动电流很大，会对电网造成冲击，也会家里其他电器造成冲击；而变频空调开机电流很小，慢慢达到稳定工作电流，对电网的冲击小，也不会影响其他家用电器，安全有保障。

7）噪声低。变频空调无需频繁的开、关机，再加上大部分时间是在低频段运转，故整机的噪声较低，比相同功率的定速空调要低 2～3dB。

### 7.5.5　变频空调器硬件系统

变频空调模糊控制系统如图 7-34 和图 7-35 所示，它主要包括三个部分：红外遥控发射系统、室内机组控制系统、室外机组控制系统。其中红外遥控发射系统是一个良好的人机交互系统，便于用户选择相应的空调器工作方式和工作参数，控制空调器的开停。室内机组控制系统接收来自于发射系统的遥控指令，借助于传感技术，采用模糊逻辑推理自动设定风机的转速和压缩机工作频率，控制室内风机的无级调速及风门的摇摆动作，并且将有关的决策信息通过串行通信方式传递到室外机组。室外机组控制系统接收室内机组的串行指令，利用 PWM 脉宽调制技术实现压缩机的制冷量连续调节。三者既相互独立，又能有效地传递、交换信息，最终成为一个有机的整体，使之

达到操作方便、工作可靠、技术性能稳定、性价比高等期望结果。

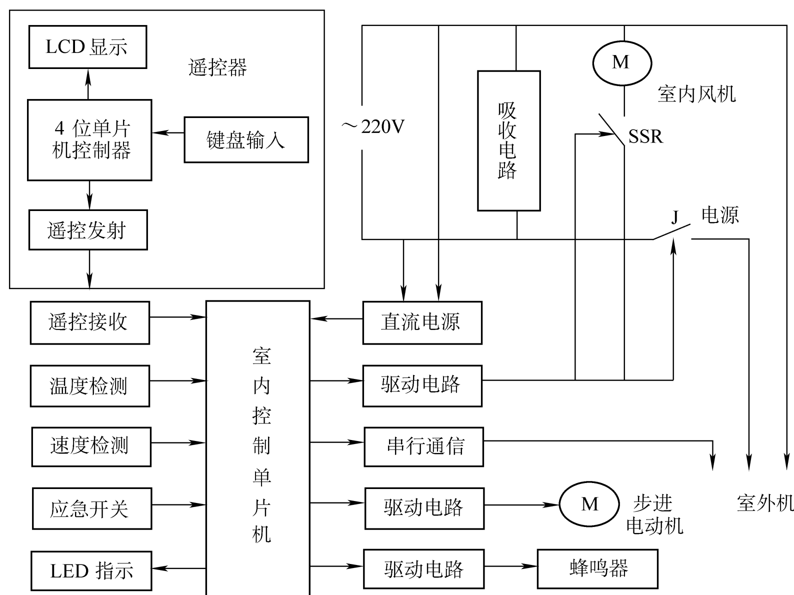



图 7-34　室内控制系统结构图

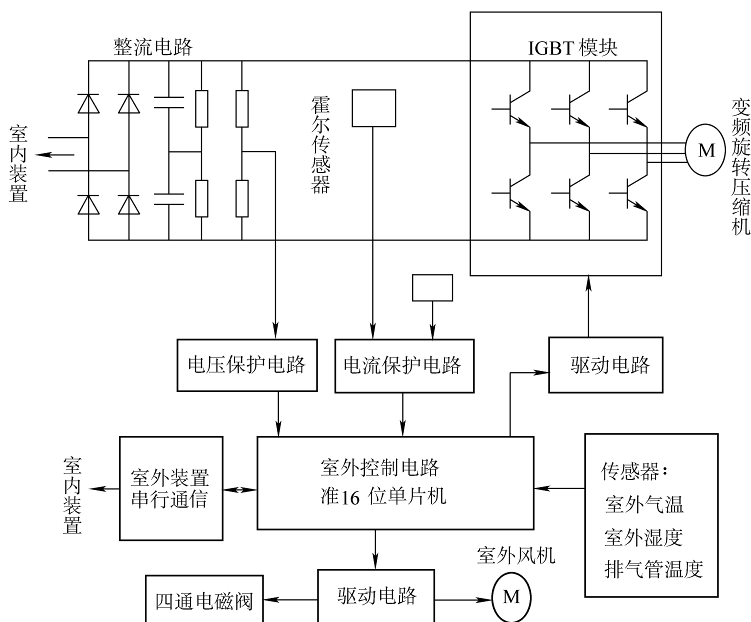



图 7-35　室外控制系统结构图

1）红外遥控发射系统。红外遥控发射系统具有良好的人机交互界面，便于用户选择相应的空调器工作方式和工作参数，控制空调器的开停。

2）室内机组控制系统。室内机组控制系统接收来自于发射系统的遥控指令，借助

于传感技术，采用模糊逻辑推理自动设定风机的转速和压缩机工作频率，控制室内风机的无级调速及风门的摇摆动作，并且将有关的决策信息通过串行通信方式传递到室外机组。

3）室外机组控制系统。室外机组控制系统接收室内机组的串行指令，利用PWM脉宽调制技术实现压缩机的制冷量连续调节。

## 7.5.6 变频调速的关键技术

空调器的变频调速技术主要由4个方面的关键技术组成：逆变器、微控制器、PWM的生成及变频压缩机的电动机选择。

### 1. 逆变器

变频空调的核心部件是变频器，其主电路采用交-直-交电压型方式。交-直过程一般采用单相二极管不可控直接整流，直-交过程一般采用6管三相逆变器，另有一个辅助电源、一个逆变器控制器和相应的驱动电路。

早期的空调变频器采用分立元件构成，整流器采用单相倍压整流电路，逆变器由6只分立的功率晶体管（GTR）构成。这种主电路复杂，可靠性差。目前大部分厂家采用的逆变桥由6个绝缘栅极晶体管（IGBT）组成，其综合了MOSFET和GTR的优点，开关频率高、驱动功率小。随着智能功率模块（IPM）技术的发展应用，IPM正在逐步取代普通IGBT模块。由于IPM内部既有IGBT的栅极驱动和保护逻辑，又有过流、过（欠）压、短路和过热探测及保护电路，提高了变频器的可靠性和可维护性。另外，IPM的体积与普通IGBT模块不相上下，价格也比较接近，因此目前应用较为广泛。

功率因素校正（PFC）环节和逆变桥集成是新一代的空调器逆变电源技术。PFC技术的应用不但可以极大改善电网的工作环境，减少输电线的损耗，而且在变频工作时可以减小输入端电感和输出端电容器，减小模块体积。因此PFC环节和IPM逆变桥集成一体化是家用空调器发展的必然。

### 2. 微控制器

微电子技术的发展使变频调速的实现手段发生了根本的变化，从早期的模拟控制技术发展到数字控制技术。目前国外一些跨国公司的微控制器产品占据着主要的市场，如Motorola公司的MC68HC08MP16、Intel公司的80C196MC、三菱公司的M37705等。这些公司的产品性能价格比较高、功能强大，如带有A/D转换器、PWM波形发生器、LED/LCD驱动等，且一般都有OTP产品，功耗低，可长期稳定地工作。

微控制器目前主要由单片机向信号处理器（DSP）过渡。以目前应用比较广泛的TI公司的TMS320C240为例，其具有50ns的指令周期、544字的RAM、16K的EEPROM、12个PWM通道、3个16位计数器，两个10位A/D转换、串行通讯口和串行外围接口等，采用DSP可使控制电路简单，而且控制功能强大。

### 3. PWM波的生成

在家用空调器中，目前国内大部分厂家采用常规的SPWM方法；在国外，有部分厂家已采用磁通跟踪型SPWM生成方法。该方法以不同的开关模式在电机中产生的实际磁通去逼近定子磁链的给定轨迹——理想磁通圆，即用空间电压矢量的方法决定逆

变器的开关状态，以形成 PWM 波形。该方法电压利用率高，低频谐波转矩小，频率变化范围宽，运行稳定，具有比较好的控制性能。近期出现的 PAM 控制不采用载波频率进行整流，而直接改变电压，减少了整流所需的能耗，提高了变频器的工作效率，满足了节电和降低高次谐波的要求，使供暖能力得到提高。

**4. 变频压缩机的电动机变频**

压缩机电动机主要分为交流异步电动机和直流无刷电动机两种。目前国内一些大的压缩机生产厂家如万宝、松下、上海日立、东芝万家乐等已有能力生产变频压缩机（包括交流机和直流机）。交流电动机成本低，制造工艺简单，但其节能效果较差。直流无刷电动机拖动由无刷电动机本身、转子位置传感器和电子换向开关组成。转子磁极为永磁体，电枢绕组采用自控式换流，定子旋转磁场与转子磁极同步旋转，通常采用按转子磁场定向的定子电流矢量变换控制，既有普通直流电机良好的调速性能和启动性能，又从根本上消除了换向火花、无线电干扰的弊端，具有寿命长、可靠性高和噪声低、控制方便等优点。

## 7.6　模糊控制洗衣机

如图 7-36 所示的模糊控制洗衣机是在神经网络智能控制下，模仿人的思维进行判断操作的一种新型全自动洗衣机。普通微电脑洗衣机采用的是量化的固定程序，一经设定，便不能更改；而模糊洗衣机则是应用模糊控制器代替人脑来分析判断，工作程序可以在一定程度上随时变化，因而具有人工智能，比普通微电脑更精确、更适用。例如一台 5kg 的模糊控制洗衣机的用水量，比双缸洗衣机节水 50%，节电 30%。



图 7-36　模糊控制洗衣机

### 7.6.1　模糊控制洗衣机的控制原理

在洗衣服的时候，通常决定洗涤效果的主要因素为：衣服的种类、水的温度、洗涤剂和机械力。衣服种类主要有棉纤维和化纤之分，化纤的衣服要比棉纤维的衣服好洗。水温越高，洗涤效果越好。洗涤剂主要是各种酶决定洗涤效果。机械力也就是洗衣机通过水流来模拟揉、搓等各种人的动作。

模糊控制洗衣机采用的传感器有以下几种：

水位传感器：可以根据洗涤物的多少自动感知，设定并自动控制水位。

布质传感器：可以根据衣物的质地、重量和脏污程度，自动采用洗涤方式。

水温传感器：可以根据环境温度和水温，自动控制洗涤时间。

光电传感器：可以根据洗涤水在洗涤过程中的透光率决定衣物的脏污程度，自动选择最佳的洗衣程序。

这几个传感器收集到的信息，经过微电脑综合判定后，便自动选择出最适当的水位、洗涤时间和洗衣动作等工作参数，并按照衣物的大小及质地等信息，执行最佳洗涤程序。

一个模糊控制系统通常由输入量、模糊推理规则和输出量组成。系统根据不同的输入量采用对应的推理规则决定输出量的大小。模糊控制洗衣机的控制原理图如图 7-37 所示。

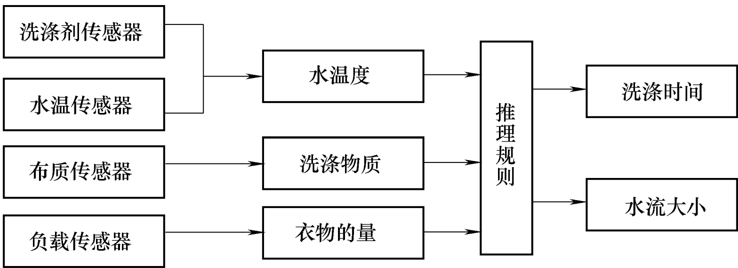



图 7-37　模糊洗衣机的控制原理图

模糊控制器的设计是模糊洗衣机的关键。模糊洗衣机的输入量为衣服量、水位高低、水温度、衣服质地、洗涤粉的种类等，输出控制量为洗涤时间、水流强度、洗涤剂的加入量等。控制器首先将从各种传感器中得到的数据按照数值的不同分成各种不同的档次，如水温分高、中、底，衣服分少、一般、多等档次，数据所分的档次越多，洗涤的精度越好，但是就会增加推理规则。然后把这些不同的档次作为输入量送入模糊控制推理器中，根据推理规则来决定洗涤时间和水流强度。通过模糊控制就可以将人们的经验用于洗衣机控制中，达到了智能控制的效果。图 7-38 为模糊控制系统框图。

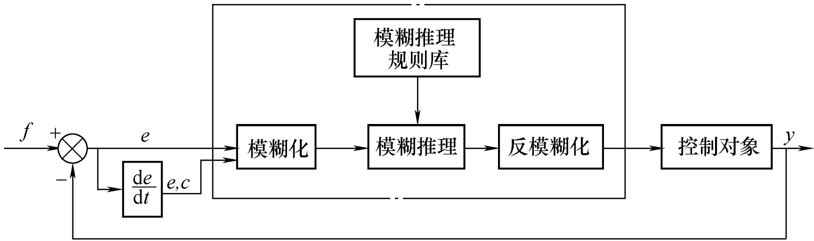



图 7-38　模糊控制系统框图

## 7.6.2　混浊度检测

目前，洗衣机中液体混浊度检测主要通过检测被洗衣物的脏污程度、脏污性质来决定洗涤时间、漂洗次数等洗涤参数。但由于受洗涤剂、洗涤方式等因素的影响，在检测过程中，被洗衣物的污染程度难以被准确地测定，其污染性质的检测更难以进行，可采用一种检测液体混浊度和导电率的传感器，通过动态检测混浊度和洗涤液导电率的变化，来决定洗涤时间、漂洗次数和时间。

被洗衣物的脏污程度越大，洗涤液越混浊，即洗涤液的混浊程度与被洗衣物的脏污程度有关。另外，根据洗涤液达到相同混浊度所需的时间不同，可判断出衣物的脏

污性质是油性还是泥性脏污，并在此基础上确定洗涤时间。为了更好地通过混浊度检测来确定主洗时间，需要摸索出一种混浊度反馈控制的检测方法，其结构原理如图 7-39 所示。

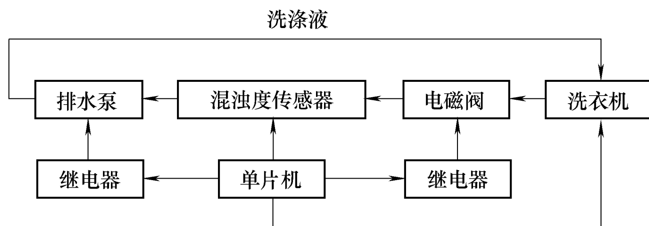



图 7-39　混浊度检测装置

该结构的工作过程是：在进行混浊度检测时，单片机先通过继电器打开电磁阀，等待 20s，待洗衣机内的洗涤液进入到排水泵后，单片机通过继电器启动排水泵，30s 后，关断电磁阀和排水泵。这样洗涤液进入到混浊度传感器的测量槽，洗涤液静止 30s 后，进行混浊度检测。以上结构中，电磁阀和排水泵的加入有以下几个作用：

1）电磁阀的截止功能能实现洗涤液混浊度的静态检测，起到硬件滤波的作用。

2）保护传感器。由于工业洗衣机进行洗涤时，温度有可能高于传感器的工作温度，因此电磁阀还可起到隔绝高温液体，从而保护传感器。

3）实时检测。排水泵的排水功能使混浊度传感器测量槽内的洗涤液和洗衣机内的洗涤液保持一致，从而实现实时检测洗涤液混浊度的功能。

光传感器是全自动洗衣机中的检测和反馈元件，它根据衣物洗涤过程中洗涤循环水的透光率（脏污程度），决定最佳洗衣程序。

光传感器由发光二极管和接收用光敏三极管构成，把它装在排水口上（见图 7-40），用于检测排水的光透射率，并经微机判断洗搽、排水、漂洗和甩干等状态。发光二极管的发光量通过 4 位 D/A 转换器由微机进行控制；光敏三极管的受光量变换成电压，通过 A/D 转换器变换成相应的数字且输入到微处理器中。

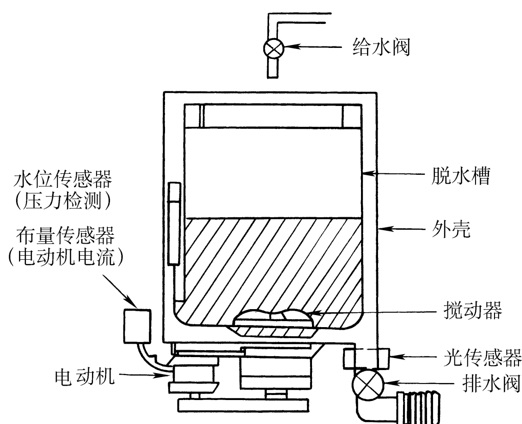



图 7-40　模糊控制洗衣机结构图

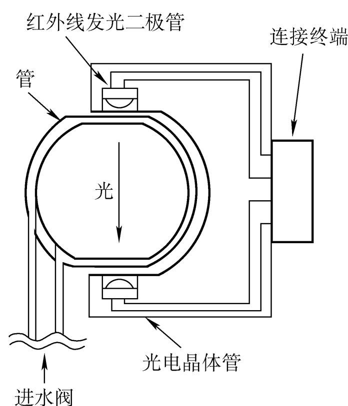



图 7-41　光电传感器组件图

图 7-41 中的光电传感器设在排水阀的旁边，发光二极管与光电晶体管把排水管夹在中间，使其对称设置，发光二极管发出的光透过洗涤液体，用光电晶体管变换电压，用微机判断其程度，然后检验洗涤液的污染程度，如图 7-42 所示。

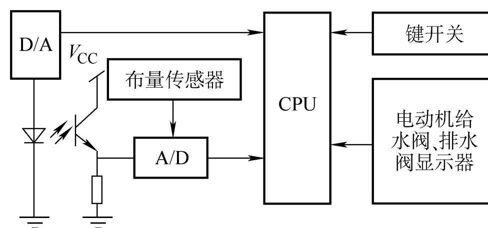



图 7-42　光传感器与 CPU 的连接

传感器的输出端连接在芯片上，经过数据处理后，可进行模糊推理，从而决定最适当的水位、水流的强弱、洗涤时间的长短、漂洗的次数及脱水的时间。图 7-43 为模糊推理的结构，根据混浊度达到饱和状态的时间（即污垢的性质），以及这时的洗涤时间，推论的规则是以“假如（或如果）……的话，就（那么）……”这样的规则所组成。例如“如果洗涤物很脏，而且有油污，那么洗涤时间需要很长”，“假如洗涤物不太脏，而且是灰泥污垢，那么洗涤时间就不需要太长”等等，按这样的思维方法，在模糊控制洗衣机上，可在各种洗涤状态下，由制定的规则，推理设定最合适的洗涤方法。

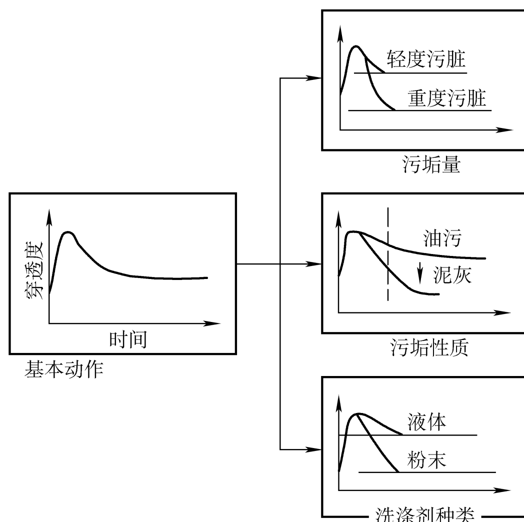



图 7-43　用光电传感器检验洗涤液的混浊度

**1. 洗净程度判断**

衣物和洗衣粉投入洗涤槽后，按启动开关开始供水。最初，由于浓洗涤液流入排水口，光传感器输出急速下降。当给水达到规定水位后，洗涤搅动器开始转动，洗衣粉溶解。洗衣粉完全溶于水时浓度均匀，透光度逐渐增加。再继续转动搅动器，衣物上的污垢开始脱落，洗涤液慢慢混浊。衣物洗净后，污垢不再出现，洗涤液混浊度不再发生变化。光传感器每隔一定时间检测洗涤液的透光度，一旦进光度不再发生变化，证明衣物已洗干净，洗涤工序终了，进入排水工序。污垢的脱落与光传感器输出的关系如图 7-44 所示。

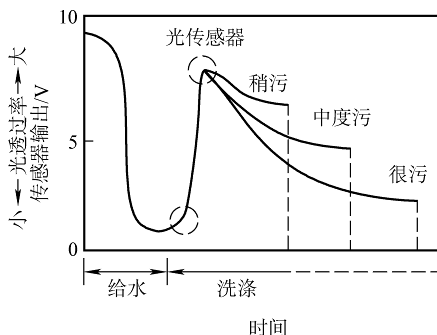



图 7-44　污垢脱落与光传感器输出的关系

**2. 排水终了判断**

洗涤一结束便向外排水，开始时由于洗涤液中的泡沫进入排水口，透射光变得散乱，光传感器输出下降。但当洗涤液流过排水口，泡沫旋即浮于洗涤液表面，排水口流过的只有洗涤液，于是光传感器的输出开始上升，当排水

即将终了时，排水口又流入泡沫，光传感器输出急剧下降。据此微机把光传感器输出急剧下降值作为最大值输入，意味着排水终了，进入下一道工序。漂洗后的水虽然不会含泡沫，但排水快终了时流过排水口的水内含有空气，同样使透射光散乱，利用上述同一原理判断排水终了。

**3. 漂洗终了判断**

洗涤后的浊水排完后，立即注入清水。当清水注入到所规定的水位后，漂洗搅拌器开始运转，首先进行一次贮水漂洗，根据漂洗液的混浊程度和泡沫多少决定漂洗方法。如果原洗液有污泥而且有脱落的纤维屑，则洗衣机自动决定用活水漂洗方法，即给水到一定的水位后，边给水边排水的漂洗；反之，用贮水漂洗的方法进行漂洗。漂洗搅拌器开始运转后，衣物中所含的洗涤液开始溶出，清水逐渐变混。漂洗过程中水的混浊程度根据漂洗搅拌前后水的光透射率之差 $V_1$ 判定。清洗过程中水含泡沫的多少根据漂洗水量最后流入排水口时光传感器的输出变化 $V_2$ 决定。当 $V_1$ 与 $V_2$ 之和很小时，证明衣物已经漂洗干净；如果 $V_1$ 与 $V_2$ 之和继续变化，则根据不同情况追加贮水漂洗或用活水漂洗，直到清洗干净之后进入甩干工序（见图 7-45）。

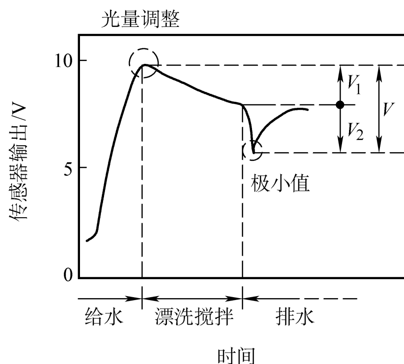



图 7-45　漂洗程度与光传感器输出

**4. 甩干终了判断**

漂洗排水后进入甩干工序，搅动器甩出衣物水分，排水口流水因含有空气，形成散乱透射光，光传感器输出下降；排水流量随着甩干过程不断减少，光透射率又慢慢回升。微机定时检测光透射率，当达到一定值不再变化时，证明甩干工序终了。

## 7.7　无动力屋顶通风机

住宅因为通风不良、空气闷热，潮气、臭味、烟气、灰尘的存在而影响情绪，使我们烦恼，生活不愉快。工厂、车间、仓库，由于高温、潮湿、霉变、异味、粉尘的存在，而对原料、成品的品质甚至人员的身体健康构成威胁。无动力屋顶通风机，也称无动力排风扇（见图 7-46），是利用室内外温差所造成的热压及风力所造成的风压来实现换气的一种装置。它不用电，无噪声，可长期运转，排除室内的热气、湿气和秽气。在发达的国家早已十分流行，有数十年的历史了。在国内，随着钢结构建筑的大量问世，安装使用无动力屋顶通



图 7-46　无动力屋顶通风机

风机，也日渐增多。

## 7.7.1　无动力屋顶通风机的工作原理

利用自然界空气对流的原理，将任何平行方向的空气流动，加速并转变为由下而上垂直的空气流动，以提高室内通风换气的效果。

利用热空气比重轻而上浮以及流体学的原理，气流会从高温区流至低温区。当室内的空气温度不同时，空气会从高温的一边通过涡轮叶片的间隙流向低的一边，于是形成自然通风现象。此外，当涡轮旋转时将室内高温空气排出，室内空气量减少，户外较冷的空气，于是流入室内以达到对流目的。如此持续不断地作用，因而达到通风、散热、除湿、排尘的效果，具有自然排气和自然通风的双重特性。图 7-47 为无动力屋顶通风机安装前后效果对比示意图。

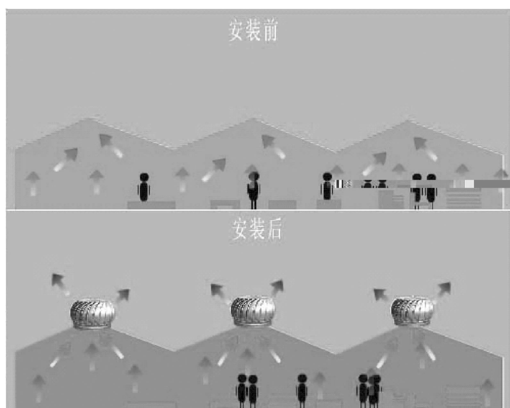



图 7-47　无动力屋顶通风机安装前后对比

## 7.7.2　无动力屋顶通风机的设备组成

无动力屋顶通风机主要由涡轮叶片、底座、定盖、轴头、支撑杆、免润滑轴承、头颈压套袋组成，如图 7-48 所示。

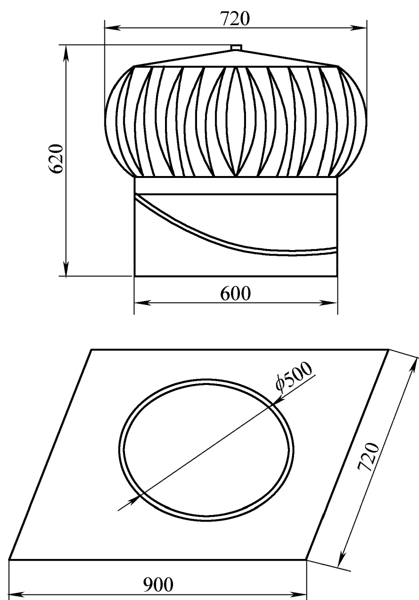



图 7-48　无动力屋顶通风机结构示意图

无动力屋顶通风机采用具有永久性润滑密封的轴承系统，灵敏性高，可在风速低于 2m/s 下运转，且无需润滑。整体采用不锈钢材料，具有耐腐蚀、抗强酸耐强碱等特性。设备无需维修。安装 300mm 的通风机每小时换气量达 $500m^3$，500mm 通风机每小时换气量达 $2200m^3$，600mm 通风机每小时换气量达 $2800m^3$。

无动力屋顶通风机数量的计算如下：

1）确定建筑的室内容积 $V_{OL}$（长 × 宽 × 高）。

2）根据建筑类型，由表 7-2 确定每小时所要求的空气变化率 $A/C$。

3）根据当地的气象记录，确定风速。

4）通风器/机数目计算公式：

$$通风器/机数目 = \frac{V_{OL} \times A/C}{换气能力（M^3/HR）（由各型号决定）}$$

表 7-2 为不同建筑类型的空气变化率建议值。

**表 7-2　不同建筑类型的空气变化率建议值（A/C）**

| 建筑类型 | 每小时排气次数 |
|---|---|
| 仓库 | 3～5 |
| 工厂和车间 | 3～8 |
| 体操馆、网球馆及回力球场 | 3～8 |
| 集会大厅 | 6～12 |
| 车库 | 6～12 |
| 造纸厂 | 8～15 |
| 电镀厂 | 12～20 |
| 涂料厂 | 10～30 |

### 7.7.3　无动力屋顶通风机的功能

1）调节室内温度，除去室内过量潮气、湿气，避免物件发霉和冬天室内结露；减低空调负荷，增加制冷效果；减轻仓库高温对贮存的商品和原料的影响。

2）促进和改善室内自然通风条件，加快室内空气交换速度，稀释并排除室内粉尘、异味、臭味、烟气等有毒有害气体和污染物，解决住宅、办公室、商场和公共场所空气质量低劣的问题。

3）使用在高层住宅楼烟出风口，使得通风井常年处于负压状态，避免大风和低气压时的废气倒灌回流、上下楼层串气味。

### 7.7.4　无动力屋顶通风机的特点

1）无需维修。严格的珠状结构，自动永久润滑上下滚珠轴承。全密封设计可防止水气及灰尘侵入，永远维持正常运转，无需维修和更换零件。

2）坚固耐用。轧制的叶片一体成形设计，采用铆钉固定，坚固耐用，无振动，整体结构能承受 180cm/h 的强风吹袭。

3）防腐防尘。整机使用高强度不锈钢制成，可耐强酸、强碱，更可耐腐蚀。特殊圆顶罩设计并 24h 旋转，灰尘不易附着，不需清洗。下雨时自动清洗。

4）防水止漏。叶片在运转时产生离心力，将室内的空气排出阻挡雨水的进入，而叶片与叶片之间因快速的旋转，形成叶片互相填补空隙，即使附着叶片上的小雨滴，也由于涡轮上的弧形叶片特殊设计导引雨水顺着叶片流落屋顶，不会流入涡轮里面。

5）灵敏度高。通风机采用高精密免润滑轴承系统，能永久自我润滑，保护轴承不会磨损，不需保养，灵敏度高。即使微风下或轻微室内外温差也能运转。

6）无噪声。根据热空气向上聚集的特性和流体力学原理，以室内外的气压不同和温度的轻微差异，辅之以自然风，使球状通风机在自然状态下自动持续不断的旋转运行，运转时无噪声。

7）重量轻且轻巧坚固。在设计规划厂房结构时，不需担心屋顶负荷重。通风机底

座可依各式厂房屋顶斜度设计，适用于各种屋面安装，且不需要支架，安装简便，零件可拆换。

8）性价比高。由于本产品属一次性投资，终身无须电力及其他消耗，所以在很大程度上降低了产品的生产成本。

9）自然美观。通风机外围护板采用金属压型彩色板，外形自然美丽大方，屋顶排风器的色彩可根据用户要求确定，每天 24h 不间断旋转，给人以美的动感，预示着生命的活泼与延续。

## 7.7.5　无动力屋顶通风机的设备安装

无动力屋顶通风机的安装示意图例如图 7-49 所示。

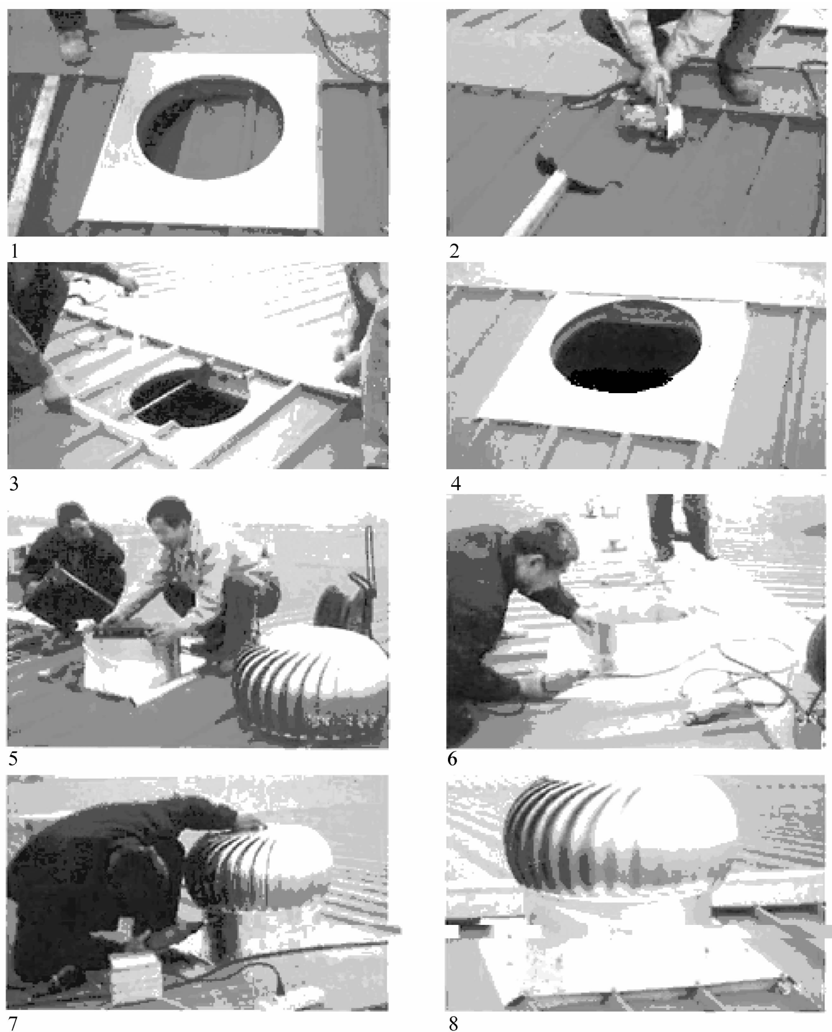



图 7-49　设备安装示意图例

### 7.7.6　无动力屋顶通风机的应用实例

1）特别适合用于潮湿性、腐蚀性、产热量大、有异味、烟气、粉尘产生的工厂车间厂房，进行通风换气、抽烟吸尘、消除异味、降温除湿，有助于降低用户的成本，是电力、冶金、化工、石油、机械等行业的各类厂房理想的通风换气设备，如图 7-50 所示。



图 7-50　工厂厂房安装情况

2）适用于仓库的通风换气、降温除湿，保持仓库通风凉爽干燥，避免因高温热气、潮湿而引起的生产原料、制成品等霉变造成损失。

3）适用于住宅厨房的垂直排烟和暗卫生间的垂直排气，如图 7-51 所示。



图 7-51　住宅安装使用情况

## 7.8　太阳能通道灯

大城市许多立交桥的通道长度超过 40m，这些通道由于采光不足，白天也显得很暗，特别是路灯开启前及路灯关闭后的 1h 和阴雨天时，通道内更是漆黑。为了行人安全，通道必须 24h 亮灯。但原有通道灯接路灯电源，只能在晚上亮灯。白天照明采用太阳能光伏系统供电，其投入小，施工方便。

### 7.8.1　太阳能通道灯的工作原理

太阳能的光电转换是指太阳的辐射能光子通过半导体物质转变为电能的过程，通

常称为“光生伏打效应”。太阳能通道灯系统原理如图 7-52 所示。其主要组成部分包括太阳电池方阵、控制器、蓄电池、逆变器、灯具。

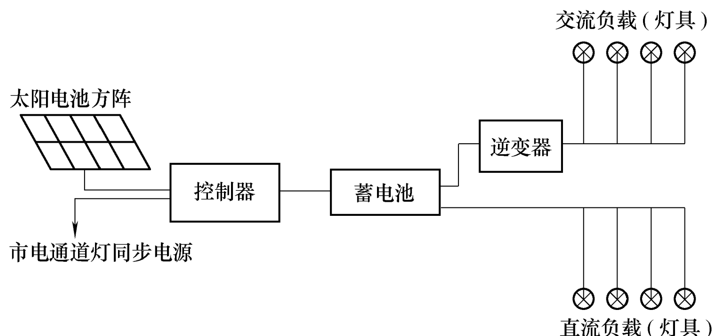



图 7-52　太阳能通道灯系统原理图

某通道长 40m，宽 6m，通道到安装太阳能装置的地点距离约 15m，原有 3 套 250W 高压钠灯，在晚上才有电源。原有通道灯总功率为 750W，用太阳能来供电所需的太阳电池功率、蓄电池容量较大，系统造价偏高，而且一套灯具 24 小时 365 天一直亮灯，灯泡寿命会降低。因此，为保证稳定的照明效果，另外安装一套太阳能通道灯系统。晚上市电供电时，原有通道灯亮；晚上市电发生故障时或白天时，点亮由太阳能供电的通道灯，保证通道一直亮灯。

## 7.8.2　直流/交流负载选择

如选用直流负载，可省略逆变器这一中间环节，提高能源利用效率。但由于通道长 40m，由蓄电池到末端灯具约 40m + 15m + 5m = 60m，24V 直流电压线路损耗高达 10%；此外，直流低压大电流控制损耗大，升降电压技术比较复杂。直流节能灯光效低（45Lm/W），寿命短（5000h），采购困难等。

相比之下，虽然使用交流负载利用率稍低，但逆变器的转换效率大于 90%，损耗并不是很大，而交流负载更实用、方便，所以选用交流负载。

## 7.8.3　太阳电池板

太阳电池板是太阳能光电转换的主要部件，太阳电池组件的峰值功率 $P_k$ 由当地的太阳平均辐射强度与末端的用电负荷需电量决定峰值功率选择（估算公式：$P_k$ = 灯具功率 × 灯具数量 × 每日使用时间 ÷ 每天有效日照时间 ÷ 太阳电池方阵实际使用功率系数 ÷ 蓄电池转换效率 ÷ 逆变器效率）。

$$P_k = 25\ (\mathrm{W}) \times 5\ (\text{套}) \times 12\ (\mathrm{h}) \div 5\ (\mathrm{h}) \div 0.7 \div 0.85 \div 0.9 = 560.22\mathrm{W}$$

1）由于市电通道灯亮灯时间由经纬仪随季节变化而调节，太阳能通道灯每天亮灯时间 11 ~ 14h，取 12h。

2）太阳电池方阵实际使用功率系数考虑了太阳电池板的充电效率和充电过程中的损耗，取 0.7。所以，太阳能板功率选取为 600W（75W × 8pcs）。

3）安装倾斜角度为 33° ~ 35°，方向正南方，既便于充分吸收太阳能，又可利用雨

水对太阳能板进行自清洗。

### 7.8.4　控制器

控制器采用 PWM 脉宽调制控制器。具备以下功能：

1）过充保护。当电池电压超过 28V 时，停止充电。

2）过放保护。当电池电压低于 22V 时，切断负载。

3）蓄电池充电温度补偿。

4）正极反接保护。

5）短路保护。

6）过载保护。

7）过热保护（带散热装置）。

8）雷击保护。

9）小功率交流补充充电系统。当阴雨天，太阳能充电不足，电池电压低于直流 22V 时，在晚上通过高频整流开关将交流 220V 市电转换成直流 24V，对蓄电池进行补充充电。

10）检测市电及切换。当晚上有市电电源时，市电通道灯亮，控制器关掉太阳能通道灯；当晚上市电故障时或白天时，控制器检测到没有市电信号，开启太阳能通道灯。这样比装时控开关更能保证通道每天 24h 亮灯。

### 7.8.5　蓄电池

蓄电池是储存电能的装置。由于太阳能光伏发电系统的输入能量极不稳定，所以一般需要配置蓄电池系统才能工作。

由于在室外安装，选用阀控免维护铅酸蓄电池。因 12V 蓄电池较为常见，所以用两个 12V 电池串连成 24V。

1）蓄电池容量选择。在上节控制器部分谈到，阴雨天时可以在晚上用市电对蓄电池进行补充充电；在晚上市电故障时，点亮太阳能通道灯。但最坏情况是两种情况同时出现，就要靠蓄电池单独供电。另一方面，为保证蓄电池稳定运行，要求蓄电池放电深度在 40%～60% 之间。当然，维护工人会及时处理市电故障，所以只需考虑市电故障和阴雨天同时出现 1 天的情况。

蓄电池容量为 $25W \times 5 \times 12h \times 1 \div 24V \div 0.4 \div 0.85 \div 0.9 = 204.25Ah$

选两个 12V/200Ah 蓄电池。

2）蓄电池在第一次使用时，要先充电到额定容量，不可过充或过放。

### 7.8.6　逆变器

逆变器通过功率半导体开关器件的开通和关断作用，将直流电能转换成交流电能。

（1）逆变器 3 种波形的比较

1）方波。结构简单，造价低，转换效率超过 75%，感抗负载差，适用于一般的阻抗负载如普通白炽灯等。

2）正弦波。转换效率高达 95%，波形精确稳定，适用于电信通信设备及一切电器负载，但造价高。

3）修正正弦波。转换效率超过 90%，性能接近正弦波，造价比较低。

因此本系统采用修正正弦波逆变器。

（2）功率选择　因节能灯启动电流是额定工作电流的 5～7 倍，负载功率为 125W，所以选定逆变器功率为 800W/24V。

## 7.8.7　其他部件

太阳电池方阵支架采用防风结构，立柱不得小于 $\phi$140mm，结构件采用内热镀锌外喷塑（确保 10 年不生锈）。

电线采用单相 RVV（3mm×4mm）。立柱接地电阻极不大于 10Ω。所有人体可能接触的金属外壳均可靠接地。

# 第 8 章　在医疗卫生方面的应用

## 8.1　医用 X 射线机

X 射线是一种不可见光，是波长很短的电磁波，且有波、粒二象性。X 射线是在高度真空的 X 射线管中产生的，是高速电子与阳极靶面相互作用的结果。

X 射线除了具备光的一般性质外，还具有其他的特殊性质，如穿透作用、荧光作用、电离作用、热作用、感光作用和生物效应等。由于 X 射线所具有的多种特性，使它能应用于多个领域。医用 X 射线机就是 X 射线实际应用的典型代表。

### 8.1.1　医用 X 射线机的组成和分类

医用 X 射线机的基本组成可分为 X 射线发生装置和 X 射线机辅助设备两大部分。图 8-1 是医用 X 射线机的组成框图。其中，X 射线发生装置包括控制台、高压发生器和 X 线管装置。

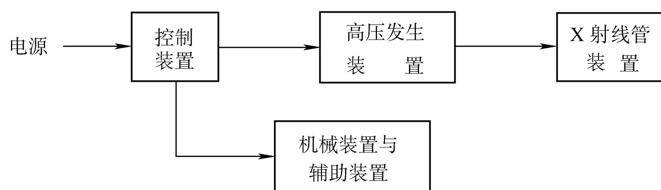



图 8-1　医用 X 射线机组成框图

大型固定式医用 X 射线机示意图如图 8-2 所示。医用 X 射线机按其使用目的可分为诊断和治疗两大类。

1）诊断机。指利用 X 射线透过人体所形成的各种影像，对疾患进行诊断的 X 射线机。这类机器通常又因结构形式、最大输出功率和应用范围不同，可分为多种类型。

图 8-2 所示的大型固定式医用 X 射线机。其结构复杂，输出功率大，使用范围广，可一机多用，多配有两个或两个以上的旋转阳极 X 射线管及影像增强器和 X 射线电视。在机械结构方面普遍采用天井悬吊装置，一般设有多轨迹体层摄影床、滤线器摄影床和电动诊视床。其功能除可做多轨迹体层摄影、胃肠摄影、滤线器摄影、放大摄影、透视外，还可根据需要添加某些辅助装置做快速摄影、间接摄影、记波摄影、录像和电影摄影等。此种 X 射线机要求有良好的供电电源，才能保证电气性能的稳定和充分发挥各种功能。

2）治疗机。是根据 X 射线的生物效应，对疾患进行治疗的 X 射线机。按其用途通常可分为三类：接触治疗机、表层治疗机和深部治疗机。

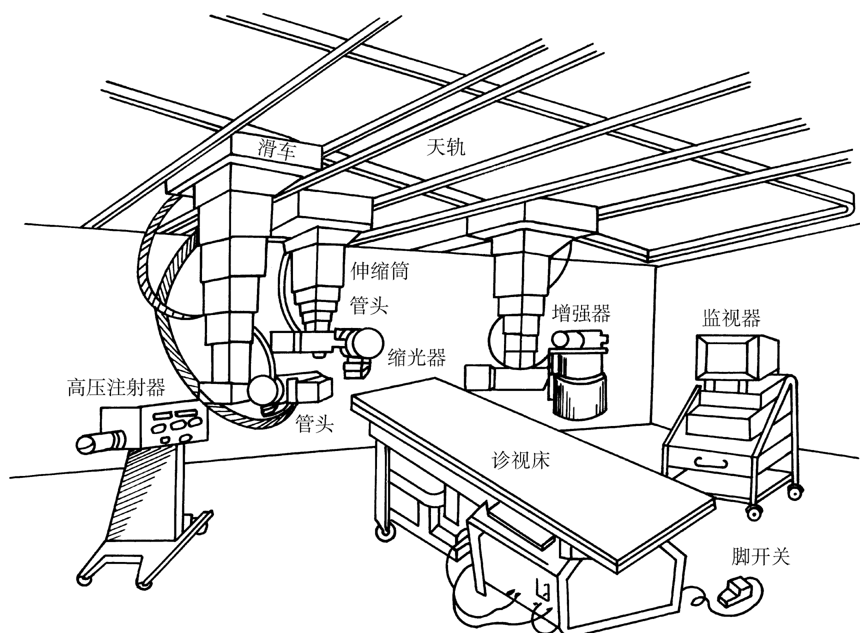



图 8-2　大型固定式医用 X 射线机

## 8.1.2　医用 X 射线机的工作原理

高压发生器作用于 X 射线源组件两极产生高电压，促使 X 射线源组件阴极灯丝（钨丝）上大量电子在真空管内高速运动，撞击高密度阳极靶，由此产生 X 射线。

临床使用 X 射线透视和摄影时，X 射线发生装置发出 X 射线穿透人体骨骼、肌肉等组织密度不同的部位，将透过人体组织载有影像信息的 X 射线通过荧光屏或胶片、探测器等影像接收装置，转换成可见的密度不同的人体组织的影像，或经过对透射的 X 射线进行一定处理进行成像，最后根据影像进行临床诊断。

## 8.1.3　医用 X 射线管

X 射线管是 X 射线机中的主要元件，是一个高真空器件。自 X 射线发现以来，经历了气体电离式 X 射线管、高真空热阴极固定阳极 X 射线管、旋转阳极 X 射线管几个发展阶段。目前常使用的是热阴极电子 X 射线管，其基本原理是利用阴极的热发射电子束在高压电场的作用下高速飞向阳极靶面，由于电子束受到急剧阻止，在阳极靶面产生能量转换，在大部分转变为热能的同时，还激发出 X 射线。

从以上原理可以得出，一个 X 射线管辐射 X 射线，必须具备以下条件：

1）一个能发射电子的阴极。

2）一个受电子轰击而产生 X 射线的阳极。

3）一个真空度较高的空间，使电子运动不受阻挡。

以下将重点介绍固定阳极 X 射线管和旋转阳极 X 射线管。

**1. 固定阳极 X 射线管**

固定阳极 X 射线管由阳极、阴极和玻璃壳三部分组成。其结构组成如图 8-3 所示。

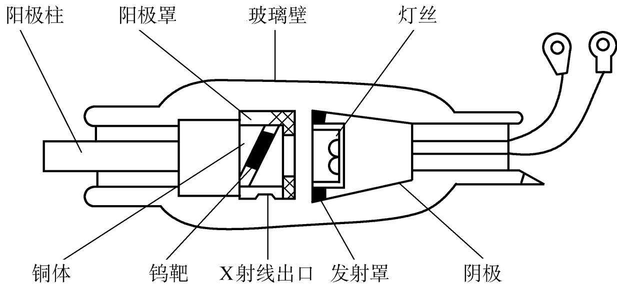



图 8-3　固定阳极 X 射线管结构示意图

阳极则包括阳极柱、阳极罩、靶面、铜体四个部分。阳极的作用是产生 X 射线，散热、吸收二次电子和散射线。阳极柱由纯铜制成，将铜体引出管外，与油之间热传导把热传导出去；靶面是用钨制成，钨导热率小，熔点高；阳极罩在靶面外面由无氧铜制成，吸收二次电子和散热线。

阴极是由灯丝和集射罩组成，其作用是发射电子并对电子束进行聚焦，以使轰击靶面的电子束具有一定形状和大小。阴极的灯丝是由钨制成，绕制成螺旋管状，作用是发射电子。功率较大的 X 射线管在阴极装置有两根灯丝，形成双焦点。一根灯丝较长些，形成大焦点，发射的电流大一些；另一根较短些，形成小焦点。阴极具有三根引线，其中一根为公用线，其余为大小灯丝的引线。集射罩由纯铁或镍制成，并开有直槽或阶梯槽，称为集射槽。如图 8-4 所示，灯丝置于槽中，槽和灯丝一端相连接，使其与灯丝同电位。灯丝发射的电子经集射槽聚焦后，轰击在阳极靶面，形成焦点面。

X 射线管玻璃壳的作用是支撑阴、阳两极和保持管内真空度。由于阴、阳两极加有高电压，且阳极的工作温度很高，因此玻璃壳多采用耐高温、绝缘强度高、膨胀系数小的硬质玻璃制成。因玻璃壳和阳极铜体膨胀系数不同，两者不宜直接焊接，故在铜体上镶有一个含 54% 铁、28% 镍、17% 钴的合金圈，再将玻璃壳焊接在合金圈上。这样也就避免因温度变化而造成玻璃破碎，导致真空度下降。

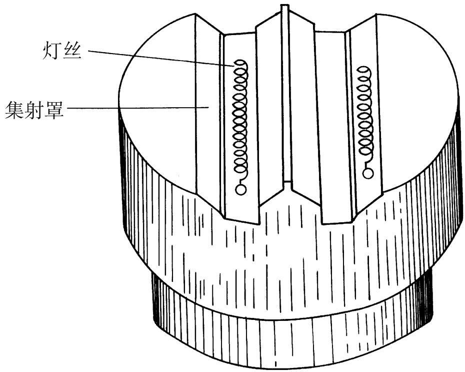



图 8-4　双焦点阴极结构

**2. 旋转阳极 X 射线管**

旋转阳极 X 射线管主要也由阴极、阳极和玻璃壳组成，其结构如图 8-5 所示。阳极做成一个圆盘，管子负载时高速转动。从偏离管子中心轴线的阴极发射出来的电子，轰击在转动的靶面上。由于因电子轰击而产生的热量被均匀分布在一个转动着的圆环面上，热量分布面积要比固定阳极 X 射线管大，而单位面积上的热量大大减少，从而提高了旋转阳极 X 射线管的功率。

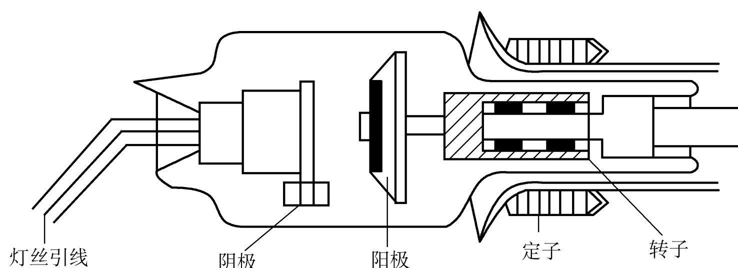



图 8-5　旋转阳极 X 射线管结构示意图

与固定阳极 X 射线管相比除阳极结构有明显差别外，其余相差不大。阳极包括靶面转子、转轴、轴承和定子。靶面镶在一个直径为 70 ~ 100mm 之间的圆盘上，靶面角度在 6° ~ 18°之间，中心钼杆与转子连接。20 世纪 60 年代以后生产的旋转阳极 X 射线管中的靶面多为铼钨合金镶在钼或石墨基体上。与以前用纯铜材料制成的靶面相比有以下优点：

1）铼钨合金靶面晶粒较细，抗热胀性提高，再结晶温度上升，靶面不易龟裂。

2）大大提高了热容量，有效提高了 X 射线管连续负荷的能力。

3）X 射线辐射率下降较慢。

## 8.1.4　医用 X 射线机的电路结构

医用 X 射线机是由 X 射线管和使 X 射线管产生 X 射线所需的全部电气元件及辅助装置构成，并通过导线连接成的一个整体。其电路组成一般包括电源电路、高压整流电路、管电流测量电路、X 射线管灯丝加热和管电流控制电路、曝光限时电路、高压一次和千伏电压补偿电路、曝光限时电路、旋转阳极起动延时和保护电路、瞬时负载限制和保护电路、整机控制电路和附属设备电路。

## 8.1.5　机械辅助装置

X 射线机的机械辅助设备是 X 射线机的重要组成部分。用不同功能的机械辅助装置，可以组成不同用途的专用 X 射线机。

**1. X 射线管头支持装置**

X 射线管头支持装置把 X 射线管头固定在一定位置上，使其以一定距离和角度对胶片进行曝光。为了尽量减少病人的移动，要求 X 射线管能有较大的覆盖面积和灵活的倾斜功能。而这些都是在 X 射线管头支持装置携带下进行的。根据上述活动需要，最简单的 X 射线管头支持装置由立柱、滑架和横臂等组成。

X 射线管头支持装置分落地式、附着式和悬吊式三大类。落地式结构简单，安装方便；附着式与滤线器床组合为一体，结构紧凑，但功能少；悬吊式不占地面位置，覆盖面积大，多用于大型医用 X 射线机中。这里具体介绍一种悬吊式 X 射线管头支持装置。

天轨悬吊式 X 射线管头支架由固定天轨、移动横轨、伸缩吊架、管头固定夹、横

臂和控制盒组成，如图 8-6 所示。固定天轨固定在天花板或专用过梁上，承担着伸缩吊架和移动轨的全部重量。移动横轨可携带伸缩吊架在固定轨上作纵向移动，范围为 2.3m 或更长。伸缩吊架在横轨上作横向移动，范围为 1.2m。吊架本身可竖向伸缩，范围为 1.5m 左右。这三者完成三维的移动。横臂在吊架下端，其一端安装 X 射线管头固定夹，另一端安装有控制盒和把手。吊架的三维活动都采用电磁锁止方式，各电磁锁止控制按钮集中设在控制盒上。

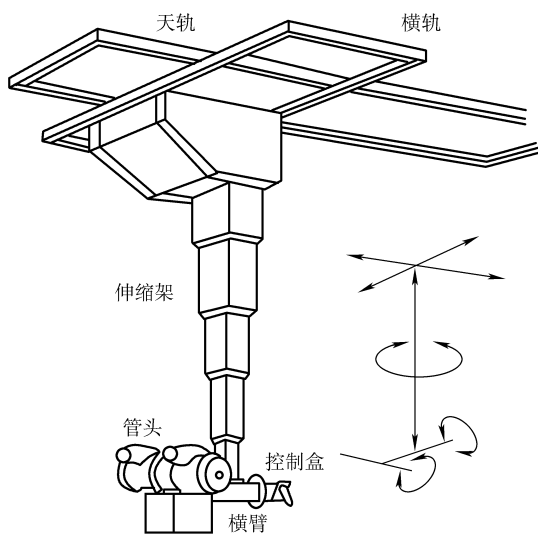


图 8-6　悬吊式 X 射线管头支架

**2. 滤线器检查台**

在 X 射线摄影中肢体接受射线照射时会产生散乱射线，呈随机方向辐射。当散乱射线作用于胶片时，在照片上形成背景灰雾，降低 X 射线照片对比度。而滤线栅板即可用于滤除散乱射线，以减少散乱射线对照片的影响。机械控制栅板和电路组合即构成活动滤线器。活动滤线器的基本原理是：在 X 射线机曝光的过程中，其处于活动状态，从而将铅条的影像抹除。这样，栅板既能起到滤除散乱射线的作用，又可不在照片上留下影子。使用活动滤线器摄片时，病人肢体不能直接处于滤线栅板上，而是将滤线器安装在专用检查台面下方，用台面承担病人肢体重量，滤线器在台面下的轨道中，对准受检肢体进行摄片，这就是滤线器检查台。滤线器检查台面是用有一定承重能力、密度均匀和易透 X 射线的材料制成的，多使用胶合板，也有用酚醛聚板和有机玻璃。台面正中标有中心线，正对滤线栅板移动范围的中心。

在使用滤线器摄影时，X 射线中心线总是正对滤线器中心，所以专用于滤线器摄影的 X 射线管总要跟踪滤线器的位置。为此专门设计了 X 射线管和滤线器为一体的专用支架。X 射线管和滤线器在支架上以中心转轴为中心对称安置，所以称为对置支架，如图 8-7 所示。支架携带 X 射线管和滤线器借助滑架能在立柱上作整体升降运动，并可在滑架轴上作 $-45° \sim +180°$转动。

**3. 诊视床**

诊视床是为满足胃肠透视的需要而设计的一种专用设备，包括床体、适时摄影装置及其平衡系统、动力及其传动系统三个部分。

诊视床有三个基本功能：

1）床身立卧功能。诊视床的床身一般都能在直立（$+90°$）、水平（$0°$）和负角度（$\leqslant -30°$）范围内绕底座支轴回转，并能停于任一位置。

2）床面移动功能。大多数诊视床能在一定范围内作升（伸）、降（缩）移动。

3）适时摄影装置移动功能。该装置又称点片装置。一般诊视床都采用床下设 X 射

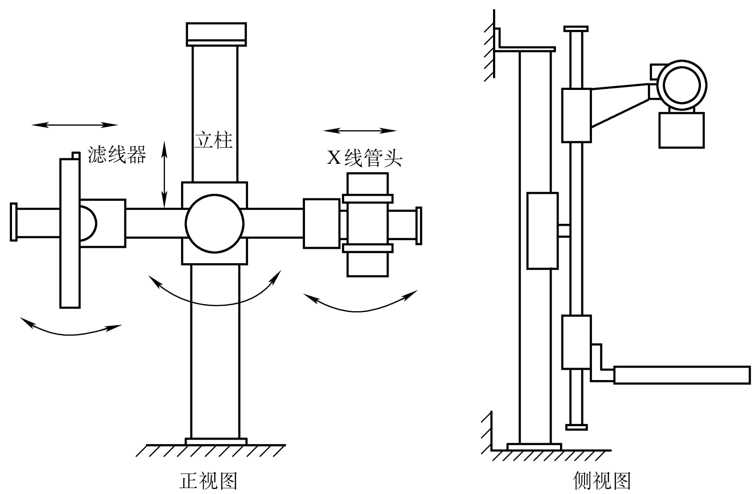



图 8-7　对置支架结构示意图

线管，床上设点片装置的结构方式。点片装置应能与床下的 X 射线管同步作上下左右移动，自身又能前后移动，并能对三维移动进行锁止。

诊视床的结构和功能示意图如图 8-8 所示。

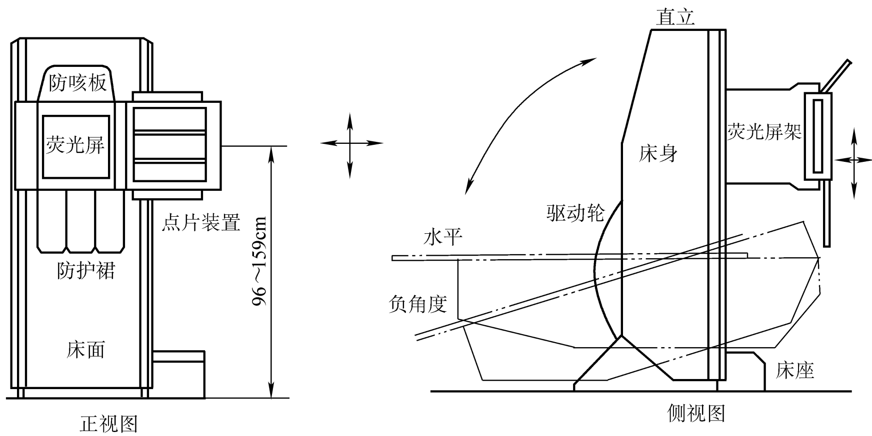



图 8-8　诊视床结构和功能示意图

## 8.2　激光音乐全息理疗系统

生命系统的特征突出表现在它的复杂性与自组织性。“健康”是指人身体的、精神的和社会适应的一种健全状态，但目前的医药学还不足以解释、剖析和处理人类生命与疾病之谜。为探索人类生命与疾病过程，基于多学科交叉、跨学科组合的现代系统医学将人视为宇宙和自然界的一个不可分割的子系统。部分含有整体的全信息系统现象，不仅存在于自然界和人类社会，也存在于人的生命过程、疾病与医药领域。

### 8.2.1　音乐与激光

一个系统随着一定控制参数条件的变化，可以分别显示出噪声、周期运动和混沌，该系统就可称为复杂系统。乐器能产生出各式各样优美动听的音乐，无疑是一个复杂过程，而激光器是所有复杂系统中最具特色的典型。激光器在低于阈值时的自发辐射，人们称其为噪声；高于阈值时便产生激光（受激辐射），是类似于正弦振荡的相干光；当远高于阈值时，就形成混沌，即出现周期分岔、奇异吸引子等一些具有确定性的非周期现象。

实际上，激光器在阈值下自发辐射的光与普通的光（如热光源）无本质的差别，都是无序的、相位混乱的。可以形象地说，自发辐射的光是无组织、无纪律的光子的乌合之众，而激光是有序的、相位一致的，是有组织、有纪律的光子大军。有趣的是，当把激光与光、音乐与声进行类比时，会发现有惊人的相似。作为声音，音乐也是物质振动产生的声波，音高对应着一定的频率，音量体现了波的强度，音色显示出一定的波形。仅从这些来看，音乐确实与其他声波无异，然而对人的听觉来说却大不一样。有的声音很平常，仅是一种用作通信交流信息的工具。有的声音很特别，很刺耳，与周围环境格格不入，使人心烦意乱，给人极不愉快的感受，以致成为一种环境污染源。只有音乐声听起来悦耳，给人以享受。如此明显的差别，当然与音乐声波的特点有关。

从某一角度看，生命的存在就是耦合振子，人体的各种器官、组织、细胞等，莫不有自己的节律，节律和节律之间、节律与外部环境之间都存在着相互作用，都有其相应的和谐音频，在一定旋律的曲调刺激下，可促使对应器官充分发挥或恢复其正常功能，使其处于最佳状态，以致产生出人意料的效果。

### 8.2.2　激光音乐全息理疗系统的工作原理

研究表明：听音乐有助于血液流畅、精神放松、消除疲劳、稳定血压和脉搏，有的音乐甚至使人心潮澎湃、感奋万分，处于情不自禁的陶醉状态。从生物物理角度来看，这正是健康人体接受到音乐信息后其肌体产生共鸣的协调反应。任何疾病也都能追溯到心理或精神上的起因，表现出对这种和谐反应程度不同的失调。实际上，人体是一个天然的辐射源，也是声波、电磁波远红外线的接收体，是信息网络构成的系统，可适应于内外环境的变化，并且有不断地新陈代谢、趋利避害、自我完善的功能。

### 8.2.3　激光音乐全息理疗系统的结构

激光音乐全息理疗系统如图 8-9 所示。使用该系统时，在看、听、唱歌曲、乐曲、舞曲或朗诵诗歌、散文、民谣的同时，用音乐电视、卡拉 OK 播放的音频信号调制激光束来辐照（刺激）人体穴位，从而开发了人体接受和享用音乐信息的新途径、新通道，把人们带入超越时空的音乐意境，获得超越理解的切身感受，形成视觉、听觉、触觉、动觉的多通道一体化激光和音乐的系统理疗、养身和对情操的陶冶。

利用音乐来调制激光辐射有多种可行的方法。图 8-10 是采用法拉弟磁致旋光效应来调制激光强度所研制的 LMH-1 型激光音乐全息理疗仪的实验设置示意图。图 8-10 给

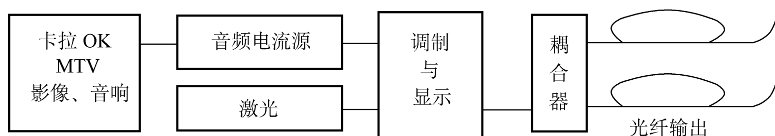



图 8-9　激光音乐全息理疗系统示意图

出了实验的具体方案，由光纤引出载有音乐信息的激光束来刺激人体穴位，示波器和 X-Y 记录仪实时显示或记下载息激光的波形等数据。

所谓磁致旋光，是指当偏振光波通过某些晶体材料时，偏振面旋转到平行于所加磁场方向的现象。这是因为在磁场的影响下，物质的固有频率或本征能级发生赛曼分裂，当线偏振光束在进入置于纵向磁场中的透明介质时，就会分裂为两个反方向旋转的圆偏振光束，其中一个对应于右旋圆偏振光，另一个对应于左旋圆偏振光，并且两者在这磁化的介质中具有不同的折射率，亦即以不同的速度通过。在离开介质时，它们又重新组合成线偏振光，但偏振面相对于入射前旋转了某个角度，旋转的角度 $\gamma$ 依赖于磁场强度 $H$ 和介质长度 $D$，它们之间的关系为：

$$\gamma = VDH$$

式中 $V$ 称为费尔得常数，与介质性质有关。上式的重要意义在于，当介质材料一定时，$V$、$D$ 都是常数，$\gamma$ 角仅按磁场的变化而变化。可以在一不太长的材料棒上绕上多圈绝缘铜导线，制成一个磁光调制器。当线圈上通过的是来自音响并经过放大的音频信号电流时，即在材料棒中建立起随音乐时变的磁场，则入射激光束偏振面旋转的角度也是随音乐而时变的，经过检偏器后，就实现了音乐对激光束强度的调制。

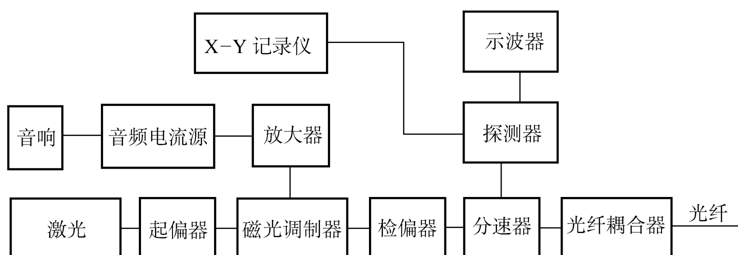



图 8-10　LMH—1 型激光音乐全息理疗实验设置示意图

# 8.3　CT 成像系统

计算机断层成像（Computed Tomography，CT）方法是用 X 射线束对人体部位一定厚度的层面进行扫描，由探测器接收透过该层面的 X 射线，转变为可见光后，由光电转换器转变为电信号，再经模拟/数字转换器（A/D）转为数字信号，输入计算机处理。

CT 技术自问世以来，其技术在不停地更新换代。CT 技术的发展始终围绕着如何提高重建图像的速度、改善图像质量、增加 CT 机的功能和降低 X 射线的辐射量等方面

进行。随着 CT 扫描速度的增加，应用范围也从头部扩展到全身。根据临床的需要，CT 系统不仅在扫描速度上有了大幅度的提高，而且在空间分辨率、伪像的消除及人机交互性能和支撑条件上也有了很大的改善。

## 8.3.1　CT 成像系统的工作原理

成像系统将选定层面分成若干个体积相同的长方体，称为体素。扫描所得信息经计算而获得每个体素的 X 射线衰减系数或吸收系数，再排列成矩阵，即数字矩阵。数字矩阵可存储于磁盘或光盘中，经数字/模拟转换器（D/A）把数字矩阵中的每个数字转换为由黑到白不等灰度的小方块，即像素，并按矩阵排列，构成 CT 图像。CT 图像是重建图像，每个体素的 X 射线系数可以通过不同的数学方法算出。

CT 成像的第一步是扫描，如图 8-11 所示。在此阶段，一束细的扇形 X 射线束投射穿过人体一个侧断面。穿过此断面的辐射由探测器阵列测量。为了获得足够的信息以产生完整的图像，X 射线束必须围绕身体的断面旋转（或扫描），以便从各个角度测量。一般要进行数百次的测量，每次所得的断面图数据都贮存在计算机中。

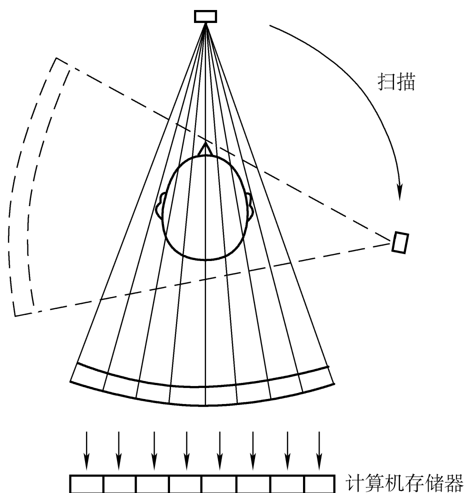


图 8-11　CT 图像形成的扫描阶段

图像产生的第二步是图像重建。这由数字计算机完成，它是 CT 系统的一部分。图像重建是把各次测得的扫描数据转换为数字图像的数学过程。图像由各个图像基元（像素）的矩阵构成。每个像素由一个数值或 CT 值来表示。每个像素的具体值与相应体积单元的组织密度有关。图像重建通常需几秒钟，这取决于图像的复杂程度和计算机的运算速度。

最后一步是把数字图像转换成视频显示，以便直接观测或记录在胶片上。此阶段是由具有数/模（视频）转换器功能的电子部件完成的。

## 8.3.2　CT 成像系统的组成

CT 成像的流程如图 8-12 所示，可以把 CT 设备分成三个部分，即扫描部分、计算机系统，以及图像显示和存储系统。

**1. 扫描装置**

扫描装置是收集透过被测体的 X 射线信息的部分，主要有 X 射线发生系统和接收透过被测体 X 射线的探测器。

（1）X 射线发生系统　X 射线发生系统包括高压控制系统、高压发生器、冷却系统和 X 射线管。人体组织的吸收系数 $\mu$ 与 X 射线的能量密切相关，扫描过程中 X 射线的能量变化引起的系数的变化会对成像造成严重影响，而 X 射线的能量取决于 X 射线

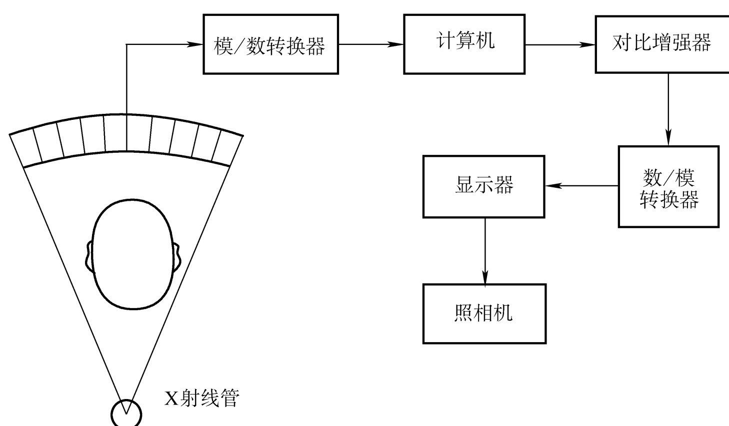



图 8-12　CT 成像流程图

管的千伏峰值（kV），因此要对高压发生器采取负反馈稳压措施保持 X 射线能量的稳定。

（2）探测器　探测器元件的功能是吸收透过人体断面的辐射，然后产生与辐射强度成正比的电信号，每个探测器测得的是穿过人体断面的部分辐射。CT 探测器一般有如下两种：

1）固态探测器。固态探测器由固态闪烁晶体组成，它能把 X 射线转换为光信号，然后通过光敏二极管或光电倍增管转变为电信号送至数据采集系统。常用的闪烁晶体有碘化钠、碘化铯、锗酸铋、钨酸镉等。固体探测器的优点是灵敏度高，具有较高的光子转换效率，但由于相邻的探测器之间存在缝隙，使得 X 射线照射面不能全部利用，因而几何利用率低。另一个缺点是很难把阵列中的每个探测器做得完全一致，造成误差影响质量。

2）气体探测器。这种形式是用充满高压气体（一般是氙气）的小电离室构成探测器。气体吸收辐射发生电离，从而改变导电性能，通过测量电流大小即可知道 X 射线的强度。气体探测器的光子转换效率比固体探测器低，但气体探测器的电离室之间用很薄的钨片隔开，其几何利用率高于固体探测器。因此实际上两种探测器总效率大致是相等的，一般在 50% ~70% 左右。气体探测器中各个探测器的电离室相互关联，处于同一气压、纯度、密度、温度条件下，具有较好的一致性。

（3）数据采集系统 DAS　固体探测器和气体探测器的输出阻抗很高，输出信号又很小，必须用高输入阻抗的前置放大器进行放大和阻抗变换，前置放大器被精密地屏蔽并置于寄存器的旁边。CT 扫描过程中测量的是每个角度下的 X 射线光子的总和，因此每次探测采集的信号要积分起来，在放大器后连接积分器。各个积分器输出的信号经过多路混合器合成为一路信号，再用 A/D 变换器变为数字信号送入主机或阵列处理机的缓冲存储器。

（4）扫描方式　CT 成像的扫描方式经历了几代的发展（见图 8-13）。

1）第一代扫描方式采用单个探测元件，它随 X 射线管在通过人体组织的一条直线

上平动，以完成一次测量。然后，把整个系统旋转一个角度（典型值为 10），在新角度位置上进行第二次平移测量，一直持续到数据足够多。扫描一次一般要数分钟。

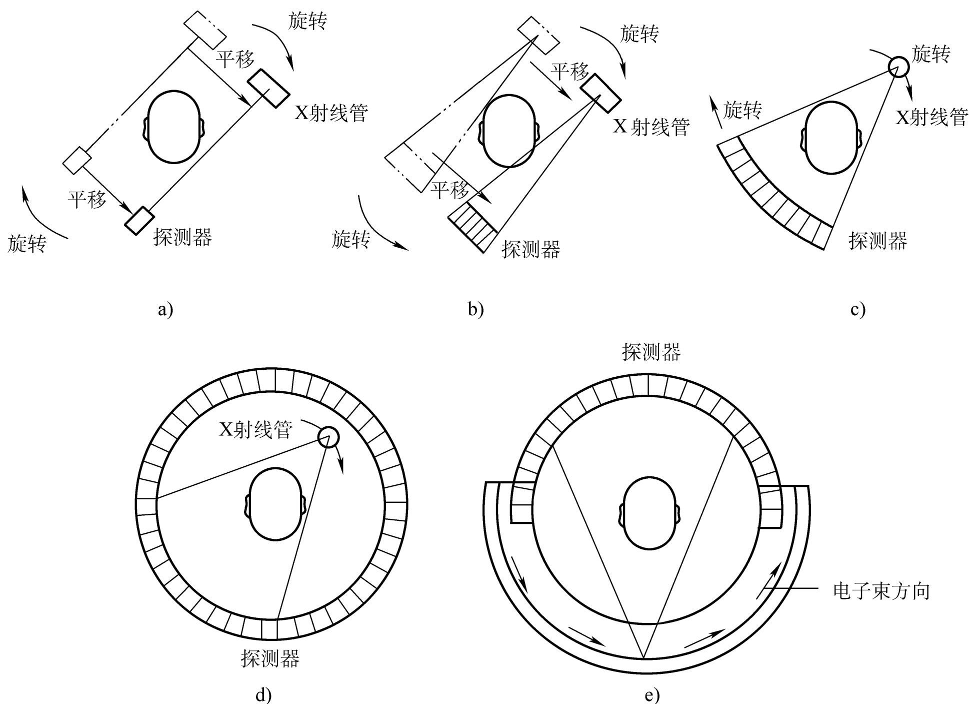



图 8-13　CT 扫描方式

a）平移-旋转式　b）平移-旋转式　c）旋转-旋转式　d）旋转-固定式　e）固定式

2）第二代扫描方式使用一组探测元件（一般有 30 个）构成阵列，波束为扇形。每次旋转角度可以大一些（如 10°），从而减少扫描次数，缩短扫描时间，只需几十秒。这两种都是平移/旋转式扫描方式。

3）第三代扫描方式的 X 射线波束也呈扇形，检测器使用一个很长的弧形阵列，阵元可达 500 个，每次工作时扇形波束覆盖整个重建区。被测组织位于扇形束中，X 射线管与探测器相对，以被测体轴为中心，旋转同时进行扫描，由此扫描时间进一步缩短，可以秒计。这是旋转/旋转式扫描方式。

4）第四代扫描方式的探测器是固定的，这种装置具有比第三种扫描方式更多的探测器，排成一个圆环。随着 X 射线管旋转，探测器阵列上的不同部分被照射。其扫描速度稍快于前一种方式，可达到 1s。这种是旋转/固定式扫描方式。

5）第五代扫描方式用发射源阵列代替机械旋转的单个发射器，接收器是半弧形阵列，这种方法可以在数十毫秒内完成扫描，实现对运动器官的快速成像。在采用这种扫描方式的实际 CT 装置中，不是用真的 X 射线管阵列排列，而是用电子束轰击一个置于真空中的半弧形钨靶产生 X 射线，再利用磁场使电子束偏转扫描钨靶的不同部位来实现 X 射线源在空间沿半弧形的旋转。

上述几种扫描方式的比较列在表 8-1 中。

**表 8-1　CT 扫描方式的比较**

| 序号 | 第一代 | 第二代 | 第三代 | 第四代 | 第五代 |
|---|---|---|---|---|---|
| 测量原理 | 平移-旋转 | 平移-旋转 | 旋转-旋转 | 旋转-固定 | 固定 |
| 测量时间/s | 数分钟 | 20～60 | 5～10 | 1～5 | <1 |
| 探测器排列 | 移动式单个探测器 | 移动式多个探测器 | 旋转阵列 | 静止圆周阵列 | 静止半圆周阵列 |
| 探测器类型 | 闪烁晶体 | 闪烁晶体 | 氙电离室 | 闪烁晶体 | 影像增强器 |
| X 射线源 | 连续发射 | 连续发射 | 脉冲发射 | 脉冲发射 | 脉冲发射 |
| 投影形式 | 平行投影 | 平行投影 | 中心投影 | 中心投影 | 中心投影 |
| 应用范围 | 脑 | 头部 | 全身 | 全身 | 心肺 |

（5）补偿器　在扇形波束照射时，由于人体截面近似于圆形，中心射线穿透厚度大，边缘穿透厚度小，因此信号强度相差较大，为了减少信号动态范围，增加补偿器进行补偿，其形状为楔形（见图 8-14）。CT 扫描系统的扫描区直径是可以改变的，一般为 120～500mm，楔形补偿器的尺寸也要相应改变，这由操作台来控制。

**2. 计算机系统**

计算机是 CT 成像系统的重要组成部分，包括主计算机、图像处理机及外部设备。计算机系统的主要功能如下。

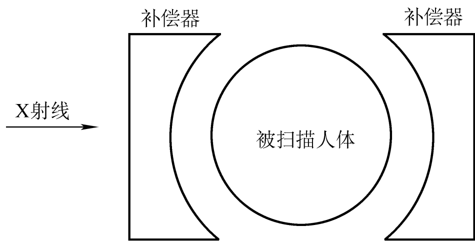



图 8-14　补偿器

（1）控制功能　是指计算机按照编制好的程序，协调、安排扫描期间各种事件的顺序，包括 X 射线管和探测器的开关、数据传递及系统监控等。此功能由主计算机完成，一般为小型计算机或超级微型计算机。

（2）处理功能　利用探测器得到的数据进行图像重建。如果一幅 CT 图像是由 512×512 的矩阵构成，重建图像时运算速度需要在每秒 $10^9$ 次以上，必须用专用图像处理机及阵列处理机才能满足要求。

（3）存储和检索功能　将图像和数据传送到能单独存储的媒体（如磁带、磁盘或光盘），以便长期保存、编辑和检索。

**3. 显示和记录系统**

一般 CT 成像装置具有两个显示器，一个用作字符显示，用于操作计算机，控制整个系统的工作。另一个采用显像管成像，用来显示重建的图像及有关的数据，还可进行其他功能的操作，如对感兴趣区的测量等。

早期的记录方式是用普通照相机拍摄荧光屏上的图像，现在 CT 成像系统一般采用多幅照相机作为记录设备。多幅照相机内装有高分辨率的示波管，产生清晰的影像，并通过专用的照相系统把影像传递到标准的 X 射线胶片上，在一张胶片上可获得多张影像。另一种记录方式是激光照相机，它直接将数字影像信号变成模拟信号用激光扫描使胶片曝光，其分辨率比多幅照相机更高。

### 8.3.3　CT 图像重建

CT 图像的重建是把测得的 X 射线的穿透量转换为人体断面的数字图像的过程。它是由计算机采用某种图像重建的数学方法而完成的数学过程，而图像重建的方法有多种。

**1. 图像格式**

图像是以单个图像单元（或像素）的矩阵形式来重建的。构成图像的像素数目一般都在 64 × 64 个像素到 512 × 512 个像素的范围内。矩阵的大小（即每幅图像的像素数）是由操作者在扫描之前选定的，显然，像素越小，数目越多，构成的图像越细致。像素的大小对于图像质量起着重要作用，必须根据满足某种临床方法需要的原则加以选定。

图像中的每个像素都与身体成像层面中组织的体积单元（或体素）相对应。单个组织体素的大小明显影响着图像质量。有三个检查变量影响体素的大小：①矩阵的大小；②视野；③层面厚度。层面厚度就是体素的深度。体素面积的尺寸等于视野除以矩阵的大小。

**2. CT 图像特点**

CT 图像是以不同的灰度来表示，反映器官和组织对 X 射线的吸收程度。因此，与 X 射线图像所示的黑白影像一样，黑影表示低吸收区，即低密度区，如肺部；白影表示高吸收区，即高密度区，如骨骼。但是 CT 与 X 射线图像相比，CT 的密度分辨率高。因此，人体软组织的密度差别虽小，吸收系数虽多接近于水，也能形成对比而成像。这是 CT 的突出优点。所以，CT 可以更好地显示由软组织构成的器官，如脑、脊髓等，并在良好的解剖图像背景上显示出病变的影像。X 射线图像可反映正常与病变组织的密度，如高密度和低密度，但没有量的概念。CT 图像不仅以不同灰度显示其密度的高低，还可用组织对 X 射线的吸收系数说明其密度高低的程度，具有一个量的概念。实际工作中，人们把吸收系数换算成 CT 值，用 CT 值说明组织密度，单位为 Hu（Hounsfield unit）。

## 8.4　流式细胞仪

流式细胞技术（FCM）是一种快速对单细胞定量分析的新技术，它借鉴了荧光显微镜技术，同时利用与荧光染料、激光技术、单抗技术及计算机技术的发展，将荧光显微镜的激发光源改为激光，使之具有更好的单色性与激发效率，因而大大提高了检测灵敏度，同时将固定的标本台改为流动的单细胞悬液，用计算机进行数据处理，因而大大提高了检测速度与统计精确性，而且从同一个细胞中可以同时测得多种参数，为生物医学与临床检验学发展提供了一个全新的视角和强有力的手段。图 8-15 为 Epics XL 型流式细胞仪。目前，该技术已经广泛用于基础研究与临床应用，在免疫学、遗传学、血液学、肿瘤学等领域内发挥着重要的作用。



图 8-15　Epics XL 型流式细胞仪

## 8.4.1　流式细胞仪的基本原理

流式细胞仪主要由激光系统、流式系统、信号处理及放大、计算机系统几个部分组成。图 8-16 概括了流式细胞仪的基本原理。当待测标本被制备成单细胞悬液，经染色后进入流动室，流动室内充满流动的鞘液，鞘液压力与样品流压力是不同的，当二者的压力差异达到一定程度时，鞘液裹挟着的样品流中细胞排成单列逐个经过激光聚焦区。如果我们将细胞中感兴趣的部分特意地标上荧光染料，那么这些染料将在细胞通过激光检测区时受激发出特定波长的荧光，通过一些波长选择通透性的滤色片，我们可以将不同波长的散射光和荧光信号区分开来，并送到不同的光电配增管中，经过一系列信号转换、放大、数字化处理，我们就可以在计算机上直观地统计染上各种荧光染料的细胞各自的百分率。选择不同的单克隆抗体及荧光染料，我们可以利用流式细胞仪同时测定一个细胞上的多个不同的特征。如果对具有某种特征的细胞有兴趣，我们还可以利用流式细胞仪的分选功能将其分选出来，以便进一步培养研究。

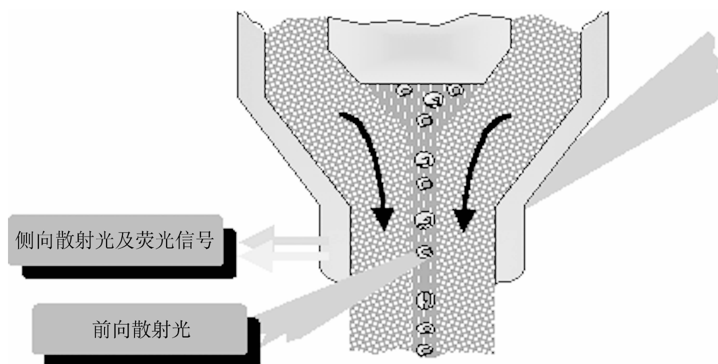



图 8-16　流式细胞仪的基本原理

## 8.4.2　流式细胞仪的基本结构

流式细胞仪主要由流动室、激光光源、光电检测装置、电子线路和计算机等部分组成，如图 8-17 所示。

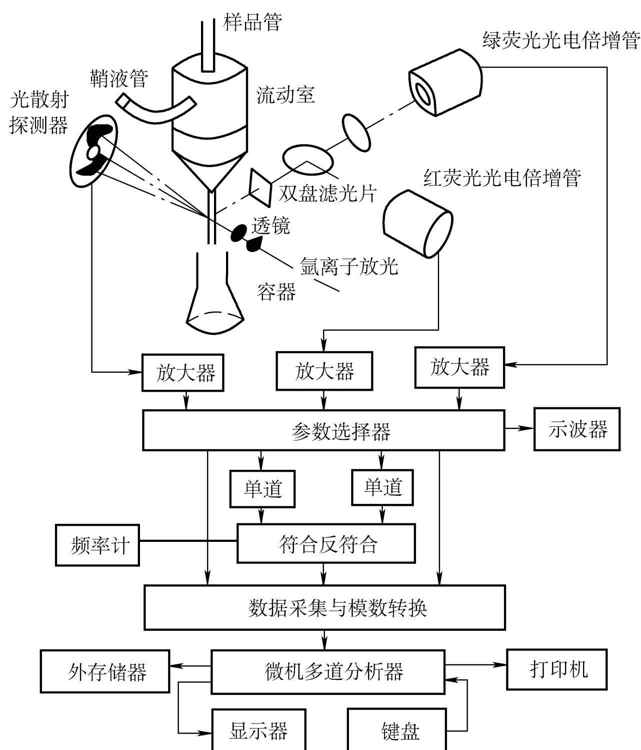



图 8-17　流式细胞仪

细胞流动室是流式细胞仪的主要部件之一。细胞制成悬浮液后使其在流动室中作稳定流动，尤其当细胞经过光学检测区时，细胞的流速必须相等而且恒定。不仅如此，还要求每个细胞在检测区的固定位置流动，一般都是沿圆形或方形管道的中心轴流动。解决的办法是用一很小的针头不断地将细胞流注入稳定流动的鞘流中，注入沿鞘流管轴心进行，然后，自然形成鞘流包围样品流通过 50 ~100μm 的圆形或方形管道，由于液流的动力学聚焦作用，细胞流以微细的流束沿细管道的轴流动。

实际应用的流动室有两种：一种为内检测型；另一种为空气中检测型。空气中检测型比较简单，用一不锈钢针头作样品管，外套一根流线型玻璃管作鞘流通道。检测区在出口管管口 1 ~2mm 处的空气中，这种细胞流动室用在细胞分选时比较稳定。细胞荧光的搜集透镜可尽量靠近细胞流，增加荧光的搜集角，减少荧光因角度分布不均匀产生的测量误差。但它使细胞荧光的像发生畸变，干扰光学系统的成像。

现在大多数激光流式细胞仪都使用方形的内检测流动室，由样品管、鞘液管和喷嘴组成。喷嘴的下方镶有宝石，宝石的中心有一个直径为几十微米的小孔。根据流体

动力学原理，当样品管和鞘液管的形状、内径和材料选择适当，压缩气体的压力控制在一定范围内，细胞悬浮液和鞘液两者就能分层流动。由于鞘液的作用，细胞极限制在液流的中心，以每秒几百至几千个细胞的速度，顺序排列由宝石中心的小孔向下喷射。

激光器是流式细胞仪的典型光源。该种激光器必须有选频装置，如腔的全反镜用涂膜棱镜，允许操作者选择合适的谱线激发染料。除氩离子激光器外，现代的激光流式细胞仪中还有使用氪离子激光器、氦镉激光器和氦氖激光器等。采用氩离子激光器作激光光源，激光光束直径约 1.5mm。为了使细胞得到均匀的照射，应使激光工作在 $TEM_0$ 单模状态。激光光束通过会聚透镜后会聚成很细的光束，其光斑直径 $d$ 的计算公式如下：

$$d = \frac{4\lambda f}{\pi D}$$

式中 $\lambda$——激光波长；

$f$——会聚透镜焦距；

$D$——激光光束直径。

通过设计的会聚透镜后，光斑直径可以缩小到与待测细胞的直径相近，从而提高了光强和分辨率。

由喷嘴喷出的细胞在激光的照射下产生荧光和散射光。在检测中，为了获得较强的荧光信号，尽可能提高接收系统的数值孔径，缩短接收透镜与细胞流的距离，使接收的空间角增大。如能增加透镜与细胞流间介质的折射率，也是提高数值孔径的方法。激光流式细胞仪中常用焦平面检测法或像平面检测法。接收到的光束有 90°散射光、DNA 荧光、RNA 荧光或细胞表面荧光等。一般采用分束器或滤波器将它们一一分离，然后送到光电倍增管，或经光导纤维送入光电倍增管。

激光流式细胞仪中的计算机是用来分析输出信号的。顺序通过激光照射区的细胞所发生的两路荧光和两路散射光，分别由四个光电倍增管检测，其光学信号转换成电脉冲信号，脉冲的幅度与光学信号的强度成正比，其宽度约为 10μs（与细胞大小、激发光斑直径及细胞的流速有关）。这些脉冲信号经前置放大器加到线性脉冲放大器或对数放大器放大。放大后的信号送到计算机多道分析器。

## 8.4.3 流式细胞仪在医学上的应用

1）淋巴细胞亚群分析。

2）感染及其治疗效果观察。

3）其他免疫功能性疾病分析。

4）诊断遗传性血小板功能缺陷疾病。

5）白血病的分类研究。

6）DNA 含量测定及细胞周期分析。

7）活细胞内活性酶的检测。

8）凋亡细胞检测。

自 20 世纪 70 年代流式细胞仪成型以来，历经多年的发展，流式细胞仪应用意义越来越得以体现，尤其是 1982 年以后，随着白细胞分化抗原意义的确认及单克隆抗体技术的发展，给流式细胞仪的应用发展提供了强大的推动力。在我国，不仅许多科研单位早在 20 世纪 80 年代已经开始使用流式细胞仪作为其科研工具，20 世纪 90 年代后，以库尔特原理及其相关血细胞分析产品闻名的美国库尔特公司，在第五代流式细胞仪的基础上推出了以单激光同时激发四色荧光的新一代临床型流式细胞仪，并为其配套了临床标本制备仪，使临床标本制备标准化、简单化，开创了流式应用的新领域。目前，不少大中型医院也逐步引进流式细胞仪作为临床诊断的辅助工具，随着单抗技术、计算机技术及其他相关技术的不断发展，流式细胞仪将会在应用领域得到不断的开拓，成为科研与临床不可或缺的重要手段。

# 第 9 章　在日用生活方面的应用

## 9.1　网络家电

随着科技的发展，网络家电的概念正逐渐进入普通百姓的生活当中。网络家电是融合了数字技术、网络技术及智能控制技术的新型家电产品，是指一种未来的家庭系统，能将家中所有的电子产品按照通信协议，通过一个单一的系统平台连接起来。用户可以通过家中某一个家电控制或通过手机远程控制家庭中所有家用电器的运作。网络家电可以实现互联而组成一个家庭内部网络，同时这个家庭网络又可以与外部互联网相连接。

现代网络家电应用包括两个层面，一是家电之间的互连，使不同家电之间能够互相交流，协同工作；二是解决家电网络与外部网络的通信。要实现家电间互联和信息交换，就需要解决两个问题：

1）描述家电的工作特性的产品模型，使得数据的交换具有特定含义。

2）信息传输的网络媒介。

在解决网络媒介这一难点中，可选择的方案有：电力线、无线射频、双绞线、同轴电缆、红外线、光纤。目前认为比较可行的网络家电包括网络冰箱、网络空调、网络洗衣机、网络热水器、网络微波炉、网络炊具等。

近几年，世界著名家用电器生产商都十分重视网络家电技术研发，制定了开放的、能够互联互通的家庭网络协议，成立了各种标准工作组和联盟组织，如：DLNA、ECHONET、E 家佳等，共同制定标准、开发产品，将家庭网络分为控制网络和娱乐信息网络，更注重家庭网络中设备的互联互通。随着各种家庭网络标准的制定出台，各相关产业的厂商纷纷推出遵循各种标准的数字家庭产品，这些产品涵盖了家庭中所有的白色家电、黑色家电、灯光、安防，实现了在家庭范围内各种设备的信息互联。微软、INTEL 联盟推出了如图 9-1 所示的数字家庭系统，海尔推出了 U-HOME 网络家电系统。海尔 U-HOME 战略就是将冰箱、空调、洗衣机等传统家电与互联网、移动通信网、固定电话网等相结合，让用户可以随时随地与自己家中所有带电设备对话，实现远程控制、信息共享。

海信数字家庭体验馆则是海信数字多媒体技术重点实验室中数字家庭系统及产品开发升级的实验与体验场所。该体验馆集成 10 余种关键技术、10 多项发明专利，实现了媒体中心、网络机顶盒、网络空调、网络冰箱、安防报警系统、智能监控系统、医疗健康系统、电子相框、网络可视电话等各子系统和 30 多种产品的集成。海信数字家庭系统彻底颠覆了过去的生活方式，让生活变得更加安全、舒适、简单。

图 9-2 所示的海信数字家庭架构主要有六大块组成：网络家电、多媒体生活、安防控制、智能管家、智能环保及家居保健。用户可以使用智能手机、计算机、智能管家

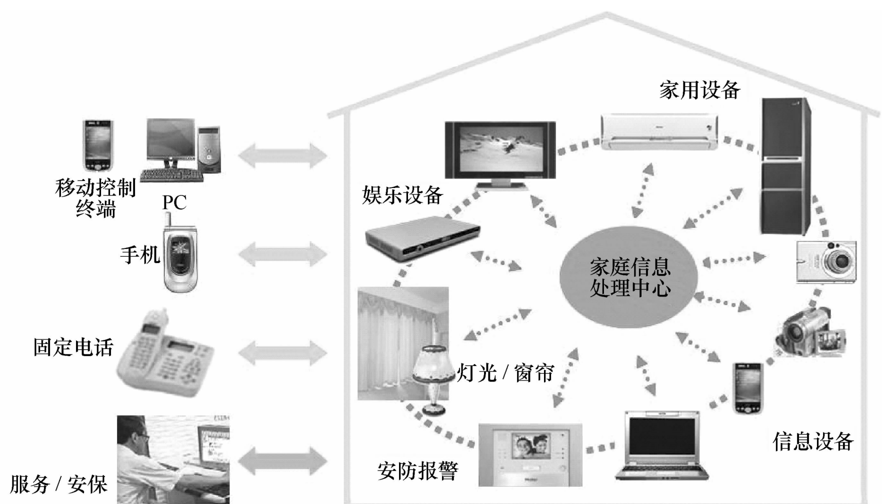



图 9-1　数字家庭系统

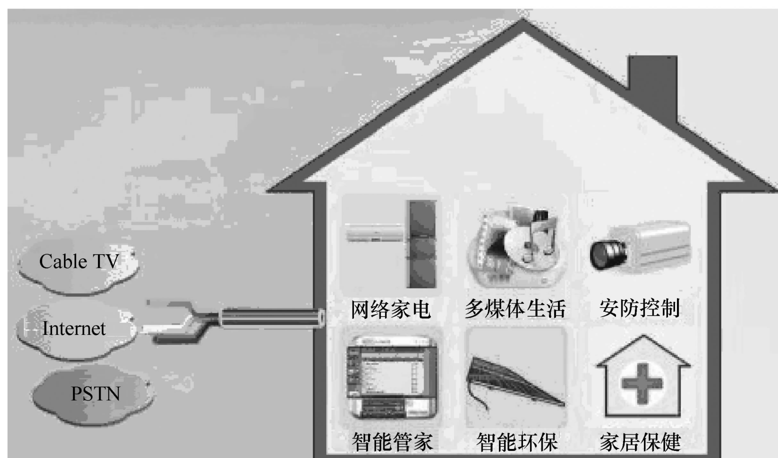



图 9-2　海信数字家庭的组成

等设备通过运用了 Cable TV、PSTN 及互联网技术的媒体中心控制家中的电视、网络空调、网络冰箱等。媒体中心是通过 Zigbee 无线互联技术，采用媒体中心可以省去那些杂乱的线路。不用再和家人抢电视，通过媒体中心聆听音乐、欣赏电影、收看电视和浏览图片甚至是直接将电视当成电脑来享受网络资源都成为了现实。

在最近家庭网络产品的发布会上所展示的各种先进的消费电子产品，为人们勾画出未来家居的生活模式——清早起床，只需按一下按键，窗帘即可自动拉开，灯光缓缓亮起，电视自动打开，洗衣机自动开始洗衣服；在你下班回家路上，通过手机发送短信就可以启动家里的微波炉、空调、热水器等，同时所有门窗将自动锁闭以保证能

源的有效利用；当你一进家门，门上方的感应器就感知到主人回来了，它自动打开了房中的灯；回到家就能立即享受清凉的室温、温热的洗澡水，并吃上可口的饭菜。同样，手机和遥控器还可以指挥其他电器开始工作。洗衣机此时正在洗衣、干衣，并通知主人衣服已经烘干。而且设计在冰箱上的电脑显示器显示着冰箱内所存储的食品及物资是否短缺并及时从网络上下载菜单，告诉你烹饪方法及配料。显示器还可以切换为电视机的功能，使你不失时机的收看新闻、了解国内外大事，同时可从网络上下载和欣赏电影节目。晚上等你上床后，面对满屋子的照明设备，你可轻按遥控器关闭所有灯具……

## 9.1.1 网络家电系统的组成

网络家电系统技术是利用计算机技术、微电子技术、通信技术，通过家电智能终端及其系统软件将家电智能化的所有功能集成起来。网络家电系统是一个多功能的技术系统，包括可视对讲、安全防范、家居综合布线、照明控制、家电控制、环境状况监测、远程视频监控、声音监听、家庭影音等系统。家居智能化主要是基于总线制、电力线载波、无线方式实现，在网络连接方面基本上采用总线制联网、电话联网或通过以太网方式实现。

家电智能终端即网络家电是网络家电系统的交通枢纽，传统家电绝大多数仅由单片机控制，达不到远程智能控制的要求；网络家电是将传统家电的微控制器升级为具有网络功能的微控制器，结合完整的嵌入式系统，实现了网络技术和家电控制系统的无缝连接。网络家电系统的组成如图 9-3 所示，主要由以下四部分组成：①家电接口控制单元，实现 RF 信号到家电 UART 接口信号的相互转换，作为组网家电的无线数据调制解调器；②家电网关是网络家电的信息传输控制中心，内置无线数据调制解调器，通过接受上位机（PC、笔记本计算机）、移动电话及手机指令对注册的家电进行控制、查询等操作；③PC，通过家电网关对家电进行复杂的控制、查询、记录等操作，主要为网络家电控制软件提供运行平台，同时通过国际互连网实现家电的远程监控；④GSM 移动电话，实现远距离、可移动的无线控制功能。

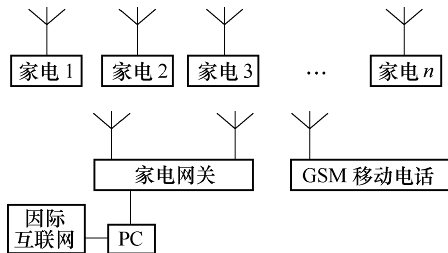


图 9-3 网络家电系统的组成

家电接口控制单元 MCU 采用东芝公司的 8 位 TMP86P807 微控制器；RF 收、发电路选用 Chipcon 公司的 CC1000，该电路可工作在 300～1000MHz 的频率范围内，输出功率及工作频率可编程。FSK 的数据传输可大于 76.8kbit/s，无需外接 RF 开关、IF 滤波，外围电路简单。通过对 CC1000 内部工作寄存器进行适当配置即可实现各种不同的应用。

家电网关是连接网络家电的枢纽，对处理器的要求较高，选用瑞萨科技的 16 位微控制器 M30245，内置 128KB FLASH、10KB RAM、1 个全速（12Mbit/s）USB 接口、4 个 UART 通信接口、8 路 10bit A/D 转换器、5 个 16 位多功能定时器等，还包含硬件 CRC 计算电路，看门狗等电路，图 9-4 为家电网关的原理框图。

RF 模块单元完成单片机数据的无线收发功能；GSM 模块是单片机与移动电话和短消息通信的链路；SIM 卡是允许 GSM 模块入网的身份识别装置；显示及按键单元实现家庭网关的简单控制及显示；EEPROM 保存注册家电和手机的识别码及个性化控制所需的相关信息；USB 接口实现家庭网关与 PC 的快速通信；RS232 接口用于两者之间的中断通信；开关量输入、输出接口实现用户自定义数字信号的采集和输出控制；仿真调试接口实现程序的下载及调试。

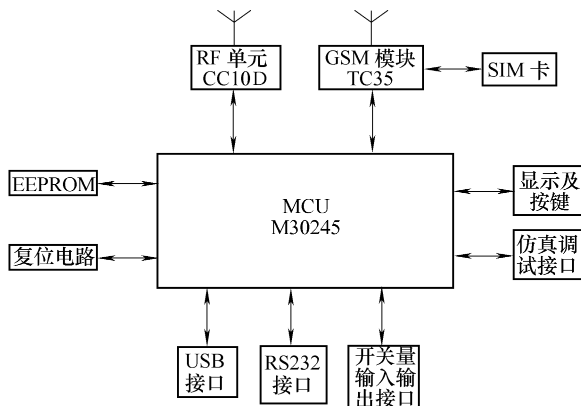



图 9-4　家电网关的原理框图

## 9.1.2　典型的网络家电

### 1. 网络洗衣机

图 9-5 所示的网络洗衣机可以自动下载最新的洗衣程序。如果用户不知道什么样的方法清洗最好，在洗衣机上超大的液晶显示屏上可以轻松调阅洗衣帮助信息。要洗的衣物在上班前放到洗衣机里，在上班期间用户可以远程实时启动洗衣机，调整洗衣过程中的各种参数，控制洗衣水温和洗涤时间。这样的操作可以在办公室或千里之外的地方进行，不用等到下班后再洗。



图 9-5　网络洗衣机

海尔自主开发的海尔网络洗衣机，用户可以在下班前通过网络打开家中的洗衣机，进行远程控制洗衣，随时了解洗衣机的运行状态，实现人机交流。海尔网络洗衣机还可自由编程，根据衣物的脏污程度由用户设定洗涤、漂洗、甩干程序。此外，还具有可根据衣物多少自行选定最佳水位和洗涤时间的模糊控制功能，以及十二档水位选择和预约功能等。一旦发生故障，信息会立即反馈到维修服务中心，可得到远程或上门服务。

### 2. 网络热水器

海尔新推出了如图 9-6 所示的时空舱电热水器，该产品的最主要的特色是可以通过电话进行远程控制，无论是用户突然出差，还是运动完毕，或者是出差返程途中，只要你提前打一个电话，家里的时空舱就能开始工作，并能适时控制调节温度或关机，保证用户一回家就能洗上热水澡。

电话遥控功能原理为：只要在家里的固定电话上安装一个发射模块，就能实现与热水器之间无线通信，不受墙壁的阻碍。该产品穿墙遥控距离可达 30m，能穿三层墙。可方便地实现由于燃气热水器不允许安装在浴室，只能安装在厨房，浴室洗澡时温度不合适时候的调节问题。可以更好地满足消费者个性化洗浴的需求，方便节能。在电话号码设定方面，它可以通过任意一部电话对热水器进行远程操作，如图 9-7 所示。只要记住自己的权限密码，就不用担心其他人的误操作。FCD-HM60AⅡ时空舱电热水器将收音机与热水器有机结合，用户在享受放松洗浴的同时还能聆听精彩的广播节目，听听音乐，给洗浴更添乐趣。


图 9-6　海尔时空舱电热水器

### 3. 网络冰箱

由于厨房已经越来越成为家庭生活的焦点，它既是家庭聚集的地方，同时也是家庭娱乐的场所。网络冰箱可充当“中央控制器”的角色。网络冰箱是把冰箱的操作、控制实现网络化。网络冰箱包括冰箱主体、通信单元、信息处理单元。冰箱内部安装有用于识别存放物品条形码的扫描仪。通信单元由用于将扫描仪的数据加密并打包发送的单片机、接口电路、网卡组成。信息处理单元由用于数据处理和验证的网络服务器、用于存放特定冰箱的条形码对应物品信息的后备数据库组成。网卡经数据传输线与网络服务器连接。网络服务器与用于信息查询并提示的信息发布单元连接，能异地远程了解冰箱内部物品存储的全部情况，并根据信息处理结果实时提供提醒的网络冰箱。


图 9-7　电话远程遥控热水器

图 9-8 为 LG 网络冰箱，它拥有独享的 LAN 接口，可以实现对冰箱内的食物进行实时监控，分析出食物的在库时间。连接互联网后，新的菜谱会不断自动更新到冰箱上。冰箱会自动将食物按照种类及营养成分分类，也可以在互联网上按照营养成分查找食物。在冰箱的 LCD 屏幕上收看电视节目，15.1in（1in = 0.0254m）的 TFT 液晶屏幕可视范围为 160°。用户还可收听 MP3 及听广播，或接 DVD 播放器，欣赏 DVD。利用冰箱配置的摄像功能，用户可以在冰箱上留下食品记录给其他的家庭成员。通过冰箱内置的数码相机，用户可以拍摄和保存照片，并在照片上增添时间、日期等信息。所拍摄的相片可以作为冰箱屏幕的屏保使用，也能上传到互联网上，或者通过电子邮件方式传送。通过冰箱内置的音乐播放功能，欣赏 MP3，收听 FM 广播，实现将烹饪的乐趣

和音乐欣赏合而为一。

**4. 网络摄像机**

网络摄像机是集视频压缩技术、计算机技术、网络技术、嵌入式技术等多种先进技术于一体的数字摄像设备。除了具备一般传统摄像机所有的图像捕捉功能外，机内还内置了数字化压缩控制器和基于 WEB 的操作系统，使得视频数据经压缩加密后，通过局域网、互联网或无线网络送至终端用户。而远端用户可在自己的 PC 上使用标准的网络浏览器，根据网络摄像机带的独立 IP 地址，对网络摄像机进行访问，实时监控目标现场的情况，并可对图像资料实时编辑和存储。



图 9-8　LG 网络冰箱

网络摄像机不仅可基于计算机局域网用于区域监控，如住宅小区家庭网络视频监控，办公楼、商场、银行网络视频监控等，而且也能通过互联网用于新型的跨区域远程视频监控及网上展示、远程儿童及老人看护、无人值守通信机房网络视频监控、旅游景点网上演播、产品网上展览等，还可以获取允许您与同样具有网络摄像机的朋友进行视频通话的软件。您可以与位于地球另一侧的业务同伴举行视频会议，还可以进行视频访谈并在您的博客中实时播放该访谈。有些网络摄像机软件甚至会直接将图像传输到您启用了网络功能的掌上计算机或智能电话上。还有一些产品允许将您的摄像放像机连接到您的网络摄像机装置，以便让每个人都能通过互联网观看您的渡假镜头。

## 9.2　4D 影院

所谓 4D 电影即三维的立体电影和周围环境模拟组成四维空间。观众在看立体电影时，随着影视内容的变化，可实时感受到风暴、雷电、下雨、撞击、喷洒水雾、拍腿等身边所发生的与立体影像对应的事件。4D 影院的座椅具有喷水、喷气、振动、扫腿等功能，以气动为动力。环境模拟仿真是指影院内安装有下雪、下雨、闪电、烟雾等特效设备，营造一种与影片内容相一致的环境。以上两类电影都有身临其境、惊险刺激的效果。这两项电影既有共性，也有个性。身临其镜、惊险刺激、感受科技是它们的共性；一个是在运动中感受刺激、一个是在视觉中感受刺激，这是它们的个性。

### 9.2.1　4D 影院系统的构成要素

如图 9-9 所示的 4D 影院一般由三个要素构成：立体放映系统、动感特效座椅与特效设备、计算机控制系统。这三者协同作用，构成一个系统。



图 9-9　4D 影院

## 9.2.2　环幕立体放映系统

立体放映系统包括立体影片和立体放映设备，4D 动感影院所播放的具有立体效果的影片，通过计算机相关软件建模、渲染所生成。

**1. 银幕结构**

从视觉角度讲，采用 180°的柱面环幕立体影像——它是指银幕保持在有相同圆心的一段弧度上，而不是一个平面（平幕）上。银幕的高宽比例为 16∶9，柱面环幕 3D 物体运动影视范围大为扩展、开阔视野，摆脱了平面视觉束缚，使影视空间和现实空间更为接近，并且可以产生横越、环绕等多种运动方式，从而产生时空变换的感觉。各种银幕配置如图 9-10 所示。

银幕通常采用金属银幕，如图 9-11 所示。适用固定放映场所的普通电影和立体电影之用，特别是立体电影，要求偏振光还原性较好。

**2. 偏振光眼镜**

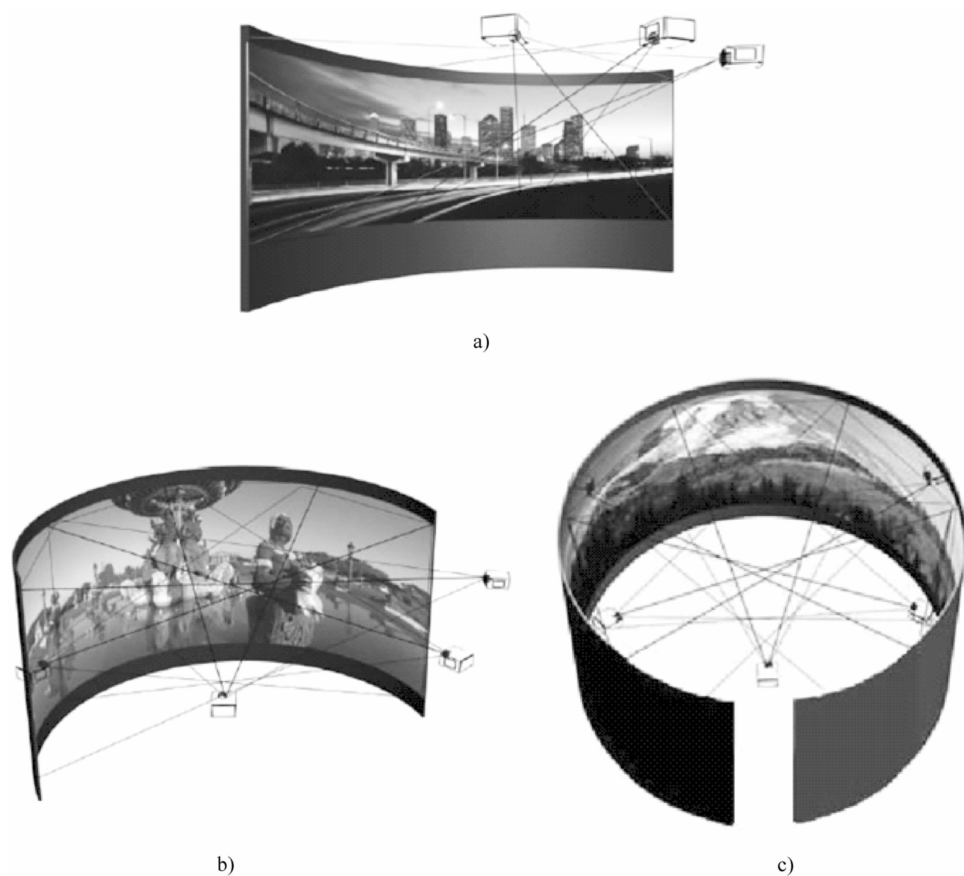
针对柱面画面效果的需要，专门设计和制造了适合于观看柱面电影的柱面偏振光眼镜，即“立体眼镜”（见图 9-12）。使观众左眼和右眼看到的影片的图像不同，这样反映到人脑中的影像就是 3D 影像，从而创造身临其境的立体视觉空间。偏振光眼镜采用 ABS 塑料高强度镜架，高对比度和高透过率线性偏振片，左右眼 45°正交。

偏振光眼镜的技术参数为：

偏光度：97%

透过率：单体 43（±1.5）%　　平行 36（±1.5）%　　正交 <2%

左右眼正交方式：±45°



a)

b)　c)

图 9-10　各种银幕配置示意图

a）3 路配置示意图（适用范围：120°～150°弧形幕）

b）4 路配置示意图（适用范围：180°～210°弧形幕）

c）5 路配置示意图（适用范围：240°～360°弧形幕）

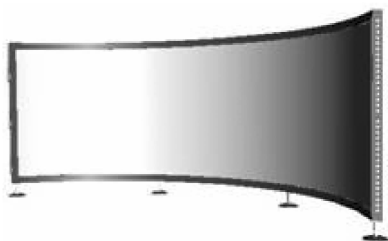


图 9-11　金属银幕

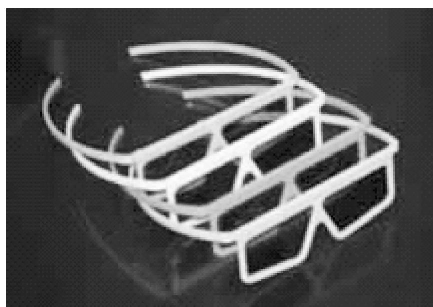


图 9-12　偏振光眼镜

### 9.2.3　特效座椅和特效设备

4D 动感系统是能够实现 3 自由度运动的特效液压平台和特效设备。4D 动感特效液压平台可以两个人一个单元，也可以多个人一个单元。

特效座椅根据影片的故事情节包含由计算机控制做出的五种特技效果，分别是坠落、振动、喷风、喷水、拍腿。另再配以精心设计的烟雾、雨、光电、气泡、气味、布景、人物表演等引入 3D 影视，从而调动了人的所有感知系统，使人真正走进影片情节。由于在四维影视中的电影情节结合了以上的特技效果，将观众与现场感受紧密地结合在一起，所以观众在观看 4D 影片时能够获得视觉、听觉、触觉、嗅觉等全方位的感受，体验身临其境、如梦如幻的感受。

数字音响系统采用专业影院音响系统，一般采用 5.1 声道环绕音响系统，即中央声道，前置左、右声道，后置左、右环绕声道，以及 0.1 声道重低音声道。也可以根据客户的需求，提供 7.1 声道音响系统，即在影院 5.1 声道音响系统的基础上，增加后中置和顶端两组声道，如图 9-13 所示。

顶端的音箱能模拟下雨、打雷、物体从观众头顶飞过等来自天空的声音；5.1 声道加后中置组成的音响能完全模拟观众身边所发生的事件声响音域，加强了临场冲击感。配合电影情节，营造逼真的气氛，增强身临其境的感觉。

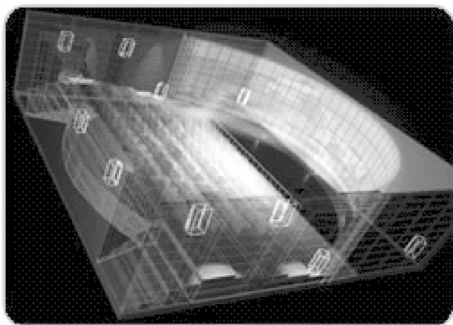


图 9-13　数字音响系统

影院内安置降雪、泡泡、降水、闪电等特效设备，可根据影片的内容，做出相应的模拟响应，增加观众身临其境的融入感和刺激感。与特效模拟相关的主要设备有雪花机、频闪灯、泡泡机、烟雾机，可作如下模拟：

1）闪电。当电影画面中有雷电镜头时，影院大厅内便会发出耀眼的闪电，同时伴有轰隆的雷声，使观众仿佛置身于盛夏的雷雨天中。

2）下雨。当影片中有下雨画面时，放映大厅中就会扬起丝丝雨花，这是由安装在大厅顶上的喷淋装置在计算机控制下完成的，观众会真实地感受到雨水从天而降，湿润了自己的头发和面颊。

3）降雪。雪花机能高效、快速地使人造雪花飞飞扬扬、漫天飘洒而下，画面下着雪，室内也下着雪，银幕上的雪花和室内的雪花混成一片，刹那间观众便置身于银妆素裹的世界之中。

4）烟雾。模拟燃烧时产生的大量烟雾，烟雾产生时伴有“火焰”，仿佛天空在燃烧。模拟云雾缭绕，袅袅白云飘舞在观众之间。

5）泡泡。产生漫天飞舞的真实泡泡。在海底世界和水下探秘时，潜水员、水生动植物由于新陈代谢的作用，会吐出许多气泡，从泡泡机吹出的泡泡在放映厅中飘荡，游离于观众之间和放映厅的每一个角落，使放映厅中呈现一派神秘的气氛。

6）降水滴。模拟自然界中弱肉强食的血腥场面，当飞鸟从头顶飞过并在你面前排泄，或古战场上两军厮杀，热血四溅等镜头出现时，40℃的恒温热水以大水滴的形式溅落在观众身上，观众能获得意想不到的冲击感。

7）振动。模拟撞击，在座椅的下面安装有一台电动机及偏心轮，产生约 12Hz 的激振力使座椅振动。当电影画面中有物体与镜头撞击或物体落地等情景时，瞬时的座椅振动能使观众感受仿佛处在一种虚拟的真实之中。

8）喷雾。模拟农田的喷、灌，清扫车的洒水，人造喷泉，人或动物面对观众的近距离呼吸等。

9）喷气。动感 4D 座椅的左右两侧各有一组雾气喷头，模拟来自观众前方的气流、微风等。

10）喷雾、喷气的扩展。座椅装有雾、气喷头，通常是并联使用，也可以各自独立使用，这样座椅就扩展成可喷不同的水雾和不同的气体。

11）扫腿。模仿小动物爬到裤脚里面的感觉。

12）耳风。从耳朵后方吹风，使观众能从立体方位感受到环境的刺激与真实性。

13）耳音。座椅背上的立体声扬声器，在特定的环境下发出声音，可使观众感受到极近的刺激效果，仿佛有东西就在您的脑后，将要对您进行攻击。

### 9.2.4 计算机控制系统

控制系统根据影片的内容，在准确的时间点设定命令，用以控制放映系统、特效座椅、特效设备、音响系统等的开关。

4D 影院的计算机应用软件主要功能有：

1）动感座椅测试软件。

2）放映、动感座椅运动、同步控制软件。

3）座椅同步运动采集软件。

4）数字滤波软件。

5）4D 特效编制软件。

6）运动曲线修正软件。

7）AC—3 5.1 声道解码及播放软件。

8）多影片同步播放软件。

9）投影机开、关控制软件。

10）应急处理软件。

## 9.3 全自动洗碗机

洗碗机是一种能够替代人工洗涤、清洁各种餐具，如碗、杯、盘、匙、刀、叉、筷等的专用设备。使用洗碗机，不仅可以把各种餐具洗干净，而且还能够起到烘干、消毒、减少细菌交叉污染的作用。

## 9.3.1　全自动洗碗机的工作原理

全自动洗碗机由电动机驱动洗涤泵，形成很高喷射压力的水流，从喷臂孔中强烈地喷射出来。喷臂不断地将带有洗涤剂或漂洗剂的热水以一定的压力从三维方向均匀密集地喷射到餐具表面，进行强力冲洗；热水对食物残渣进行浸泡膨化；洗涤剂对油污与残渣进行乳化分解并杀菌消毒。力、热、化学作用三管齐下的强劲威力，使餐具表面的油污、残渣迅速分解脱落，再由清水强力漂洗，最后利用高温余热烘干餐具。图 9-14 为洗碗机工作原理示意图。

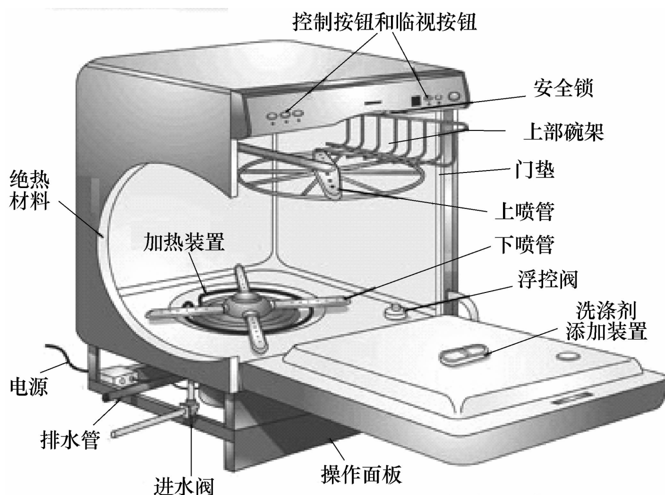



图 9-14　洗碗机工作原理示意图

## 9.3.2　全自动洗碗机的组成

全自动洗碗机的结构如图 9-15 所示，它的主要部件有箱体、控制装置、进排水阀、水泵，电动机、喷水管、网格、碗篮等。

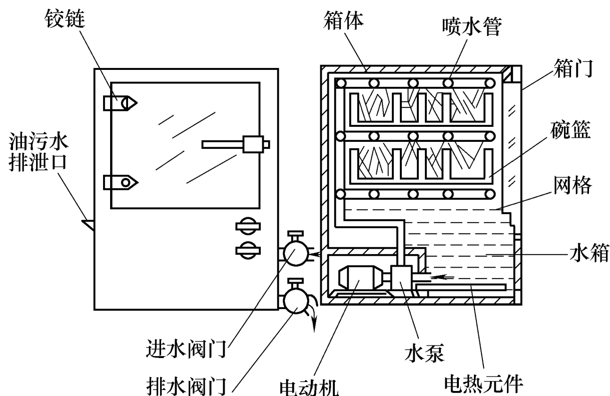



图 9-15　全自动洗碗机结构

其中，控制装置安装在洗碗机的门里，在控制面板后面。大部分的部件使用的是一个简单的电动机系统：定时器，它决定运转过程中每个阶段的持续时间和在恰当的时候启动恰当的功能（如添加洗涤剂、喷水清洗和排水功能）。比较昂贵的洗碗机可能含有计算机控制系统。现代洗碗机还

有一个门锁，必须锁上洗碗机才能运转，有些甚至有儿童安全锁。

进水阀是水从用户的供水系统进入到洗碗机的地方。水并不是靠洗碗机的泵抽入盆里的，而是当进水阀打开时，水压本身使水进入洗碗机。

泵由电动机驱动。在压水过程中，泵把水推进到喷管里；在排水过程中，泵把水引到排水管。这个泵配件安装在盆的下方，洗碗机的中心位置。泵主要有两种类型：

1）可逆型泵。这类泵通过改变电动机的方向来决定是把水压到喷管还是把水压到排水管。可逆型泵通常是垂直安装的，如图 9-16 所示。

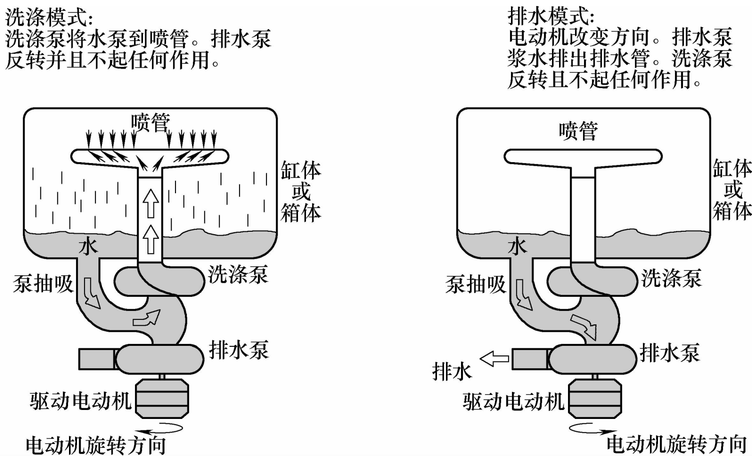



图 9-16　可逆型泵

2）直接驱动型泵。电动机只能朝一个方向运转，因此水流方向从喷管到排水管的切换是由一个电磁阀控制的，它可以打开和关闭相应的阀门，或者转换管道通路。直接驱动型泵通常是水平安装的，如图 9-17 所示。

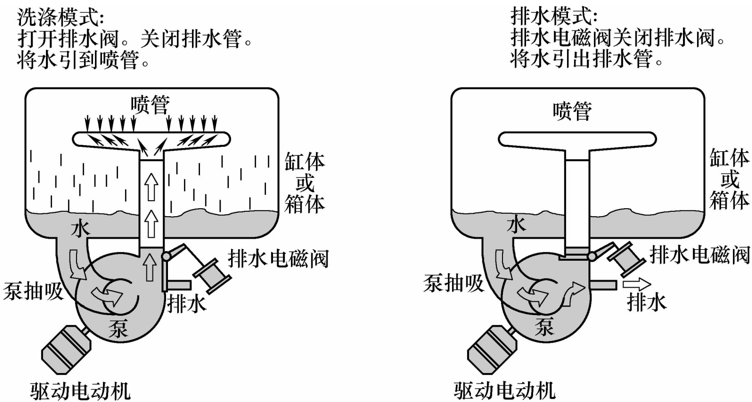



图 9-17　直接驱动型泵

### 9.3.3 全自动洗碗机的控制

图 9-18 为家用全自动洗碗机电气原理图。其工作过程是依靠水的压力、温度及洗涤消毒剂的作用，并辅以程序控制电路，通过旋转喷臂将水从不同的角度喷射到餐具上，实现对餐具的清洗、消毒和烘干。

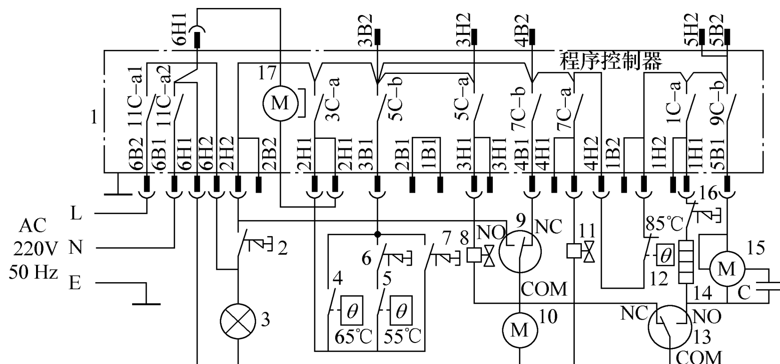



图 9-18 家用全自动洗碗机电气原理图

当顺时针转动程序控制器旋钮，程序控制器 1 接通电源，电源指示灯 3 亮，关门门控开关 2 被接通，主电路的电源随之接通。程序控制器 1 在同步电动机 17 的驱动下，步进记忆凸轮通过减速齿轮组作低速顺时针转动，按预定程序使开关相关触头闭合或断开，进水电磁阀 8 自动进水。当水位超高时，低水位开关 13 自动接通，清洗泵 15 运转，水被清洗泵加压后，通过喷臂喷水对餐具进行喷射冲洗。按下琴键开关 6、7、16，加热器 14 可按程序工作，获得三种不同水温进行洗涤。清洗过程中，水中的漂洗剂通过供料装置自动定量供给。洗涤后，当水位达到预定高度时，高水位开关 9 接通，令排水泵电动机 10 运转，污水便通过排水泵排出机外，最后利用加热器的余热将餐具烘干，这时，程控器自动关闭电源。

## 9.4 音乐喷泉

音乐喷泉是由计算机控制声、光及喷孔组合而产生不同形状、不同色彩、配合音乐节奏而构成的综合水景。它以声、光、动、形、韵的和谐为特征，体现了乐起形变、音变水舞的无穷变化，喷泉、彩灯伴随着优雅的乐曲，梦幻般地起伏，交相辉映，构成一幅五彩缤纷、优美动人的画面，具有超强的观赏性和多视角的艺术性，已成为现代城市生活中装饰效果最佳、观赏价值最高的重要娱乐设施之一。

另外，喷泉可以湿润周围空气，减少尘埃，降低气温。喷泉的细小水珠同空气分子撞击，能产生大量的负氧离子，有益于改善城市面貌和增进居民身心健康。

喷泉随着音乐变化改变其形态，呈现丰富多彩的花型变化，经由视觉和听觉共同感受音乐丰富的内涵，每支乐曲所表达的情感不同，喷泉的花型变化也不同。使喷泉的造型及灯光的变化与音乐保持同步，从而达到喷泉水型、灯光及色彩的变化与音乐

情绪的完美结合，使喷泉表演更加生动、更加富有内涵，如图9-19所示。



图9-19　彩色音乐喷泉

## 9.4.1　音乐喷泉的系统构成

音乐喷泉系统是由电气系统、音乐系统、光学系统（彩色地下灯、激光）、控制系统（控制台，控制电源柜）、机械系统（各种摇摆喷嘴装置、高压水水泵和水管）等组成，是光学、机械学、电学、流体力学、计算机技术的综合应用，涉及音乐、灯光、给排水、电气、通信和计算机自动控制等多种领域。其组成包括：

1）喷泉喷头。包括各种类型材质（如铝、铜、不锈钢）及规格的通用型喷头，特殊或特大型喷头。如百米高程喷头、拱型波光喷头、特大水晶球、特大喇叭花喷头等。

2）喷泉灯具。包括各种材质（如合成塑料、铸铝、铸铜、不锈钢）及多种功率（50～300W）水下彩色射灯（5色）。

3）水下霓虹灯。各种规格及亮度光导纤维系列与配套发光机系列。

4）激光系列。大功率多功能电脑调控彩灯及激光水幕电影发光器。

5）喷泉环境音响。音乐喷泉音响系统设备与广场环境背景音响系列。

6）控制设备。各种喷泉用可编程控制器、控制台（柜）、工控电脑及喷泉网络控制节点，以及各种音乐喷泉专业软件。

音乐喷泉控制系统是由上下两级微机组成，通过RS232进行上下两级微机的通信。上级微机负责音乐的控制编辑和喷泉造型的实时仿真，下级微机接受上级微机送来的代码，通过变频调速器控制喷泉系统的水泵，采用交流调光技术、交流变频调速技术、摇摆喷嘴伺服系统等所组成的彩色音乐喷泉，将声、光、水、色有机地融为一体。音乐喷泉系统的结构如图9-20所示。

## 9.4.2 音乐喷泉的工作原理

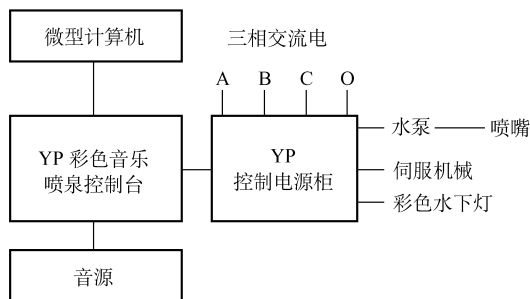



图 9-20 音乐喷泉系统框图

音乐喷泉控制系统综合当今国际上最流行的先进科技成果，集音乐控制、可编程序控制、人工智能控制技术于一体，是一种工业现场控制系统。音乐喷泉控制系统的上位主控机是多媒体工业 PC 组成的现场控制系统，能实现全程实时音控，能自行识别乐曲旋律、节奏、乐感和音频的强弱度。该系统有音频与水形的同步功能，有方便的操作界面和编配乐曲功能。

音乐喷泉是在程序控制喷泉的基础上加入了音乐控制系统，计算机通过对音频及 MIDI 信号的识别，进行译码和编码，最终将信号输出到控制系统，用音乐信号通过控制系统控制水流、灯光的变化，以随机控制或微机控制方式控制高压水泵、彩色水下灯和摇摆喷头伺服机械的工作状态。原理如图 9-21 所示。

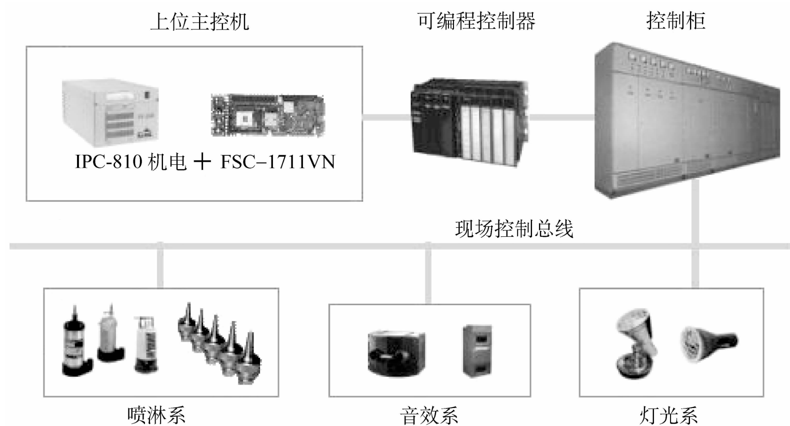



图 9-21 音乐喷泉工作原理

## 9.4.3 音乐喷泉的控制系统

音乐喷泉控制系统有三种形式：集中式控制系统、现场总线式控制系统和网络总线式控制系统。

**1. 集中式控制系统**

集中式控制系统采用放射型结构，能满足控制室离水池较近、规模较小、花型变化较少的音乐喷泉。因为集中式控制系统采用放射式线路，当水池远离控制中心时，工程所花费的电缆线路投资也就会增加。

**2. 现场总线式控制系统**

现场总线是一种串行数据通信链路。它沟通了喷泉现场基本控制设备与上级控制设备之间的联系，如 485 总线和 CAN 总线。现场总线的优点如下。

1）一条传输线可控制多台设备，使控制系统更加简单，因此也就缩短了工程施工的周期，安装和维护也更容易。

2）采用数字通信技术，抗干扰性强，精度高。

3）控制功能分散到喷泉现场，提高了电控系统的可靠性和灵活性。

**3. 网络现场总线式控制系统**

网络现场总线结构与现场总线相同，但在性能上却有本质上的提高。主要表现在以下几方面：

1）网络现场总线是最彻底的分布式控制系统。它使电控系统运行速度更快，达到音乐喷泉实时控制的要求，稳定性也更好。

2）由于网络连接结构的种类很多，能支持总线型也支持放射型，也可为混合结构。

3）网络现场总线与现场总线的主要差别是网络现场总线采用了专用网络操作系统来保证网络上各个设备之间的相互操作。

4）电控系统的调试和维护更加方便。

### 9.4.4　音乐喷泉的控制流程

音乐喷泉控制的流程图如图 9-22 所示，音乐喷泉的控制由如下部分组成。

1）音乐信号的采集和处理。音乐信号的采集由流程图中的音乐采集分析器来完成，在完成采集的同时，音乐采集分析器将采集进来的信号按照分析音乐的算法转化成有特定规律的数字信号来进行输出。

2）音乐喷泉中的水形与音乐采集分析器发送过来的数字信号和谐对应的处理过程。在这个处理过程中，操作员要根据播放音乐的旋律为该音乐配置相应的水形，所作的配置可以存储在组态王的工程中，同时也可以根据需要进行参数修改。在这个过程中，还可以根据用户的需要，定义为以下几种模式。

①　有音乐自动模式。在这种模式下，随着音乐在播放过程中旋律的变化，组态王将实时、严格地按照操作人员设定的水形配置来向控制动作机构的可编程控制器发送数据，以动态地改变当前水形来配合音乐的播放。

②　有音乐随机模式。在这种模式下，随着音乐在播放过程中旋律的变化，组态王将实时地、随机地选择水形，向控制动作机构的可编程控制器发送数据，以动态地改变当前水形来配合音乐的播放。

③　有音乐手动模式。在这种模式下，随着音乐在播放过程中旋律的变化，组态王将操作员实时确定的水形数据发送给控制动作机构的可编程控制器，以动态地改变当前水形来配合音乐的播放。

④　无音乐随机模式。在这种模式下，组态王将实时的、随机的选择水形，向控制动作机构的可编程控制器，以动态地改变当前水形。

⑤　无音乐手动模式。在这种模式下，组态王将操作员实时确定的水形数据发送

给控制动作机构的可编程控制器，以动态地改变当前水形。

在上述的五种模式下，都可以在组态王的画面中通过视频控件观察到现场安装的摄像头发送来的视频画面，还可以根据工程中确定的水形来制作相应的动画来反映音乐喷泉的当前水形。在组态王中还可以进行事件的显示和存储。

3）控制动作机构的可编程控制器接到组态王发送下来的数据进行逻辑运算，控制相应的水泵的开启和关闭、阀门的开和关，显现当前需要的水形。

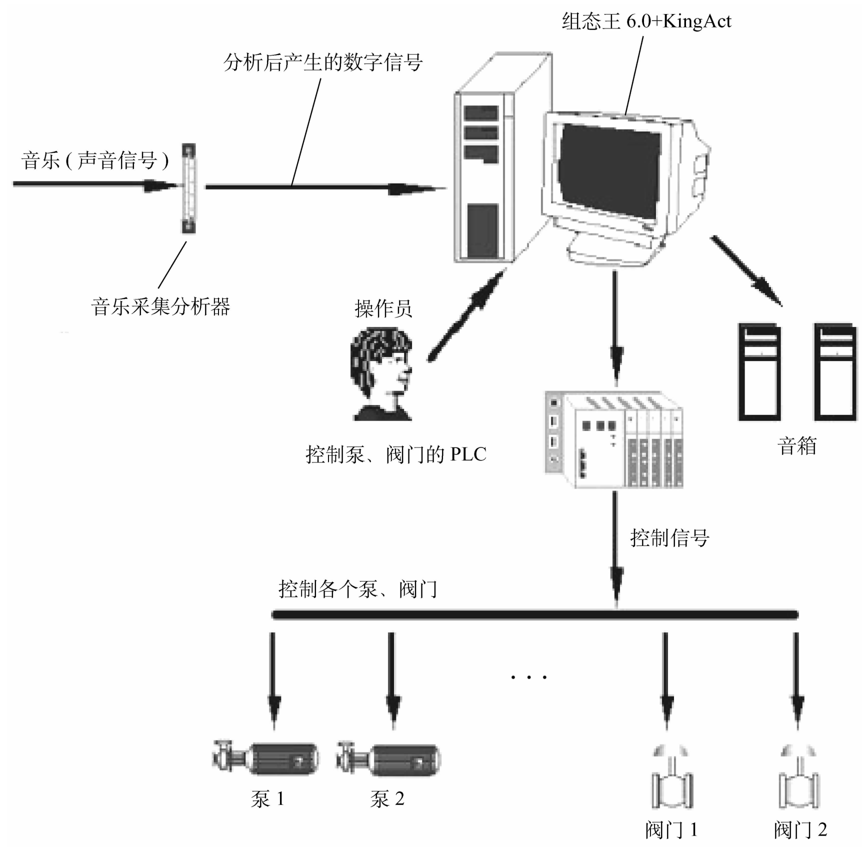



图 9-22　音乐喷泉控制的流程图

## 9.5　立体车库

汽车工业的迅猛发展和社会对汽车需求的迅猛上升，直接影响到停车问题。而目前国内较为普及的平面停车在各个大中城市已经远远不能满足车位需求，因此，如图 9-23 所示的立体停车设备顺应市场经济的发展，在市场需求的迫切影响下应运而生了。这一新型设备一改传统的停车场单层平面停放方法，向空中或地下发展，在用地紧张、车多位少的状况下，将车辆多层存放，在现代都市停车中将大显身手。




图 9-23　立体车库

## 9.5.1　常见立体车库类型及特点

按照立体车库相对地面所处位置，城市立体车库可分为：地下立体车库、地上立体车库、地上地下立体车库三种基本形式。如果按照车辆存放方式分类，则可分为：坡道式立体车库、半机械化立体车库、全自动化立体车库三种。不同类型的车库在建筑风格、车库容量、车库效能、车库内的设备等方面有很大差别，也使其基本建设投资、使用中的维护费用、车库使用的方便性等有一定差别。目前，立体车库主要有以下几种形式：升降横移式、巷道堆垛式、垂直提升式、垂直循环式、箱型水平循环式、圆形水平循环式。

**1. 升降横移式**

升降横移式立体车库采用模块化设计，每单元可设计成两层、三层、四层、五层、半地下等多种形式，车位数从几个到上百个。此立体车库适用于地面及地下停车场，配置灵活，节省占地，建设周期短，消防、外装修、土建地基等投资少，造价较低，可采用自动控制，构造简单，安全可靠，运行平稳，工作噪声低，存取车迅速，等候时间短。

升降横移式车库以钢结构框架为主体，采用电动机驱动链条带动载车板作升降横移运动，实现存取车辆。其工作原理为：每个车位均有载车板，所需存取车辆的载车板通过升降横移运动到达地面层，驾驶员进入车库，存取车辆，完成存取过程。停泊在这类车库内地面层的车辆只作横移，不必升降；而停泊在顶层的车辆只作升降，不作横移。中间层则通过升降横移运动为顶层车辆让出空位，或存取车辆。图 9-24 为升降横移式立体停车库的示意图。

升降横移式立体车库的主要特点如下。

1）变化形式较多，对场地的适应性较强，可根据不同的地形和空间进行组合排列，规模可大可小。

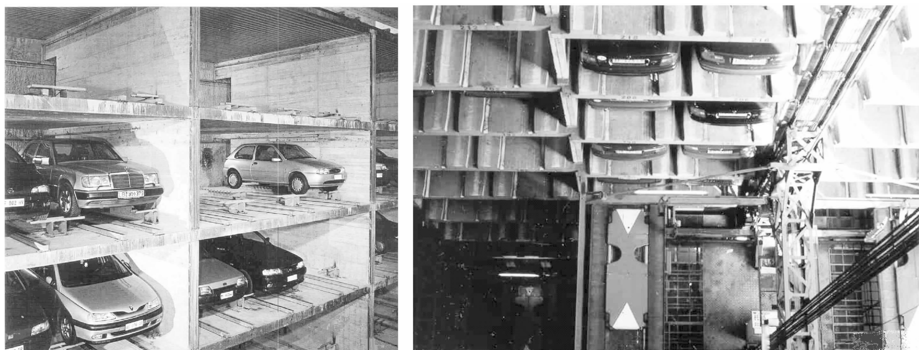


图 9-24　升降横移式立体停车库

2）安全系数大，系统具有防坠落装置、紧急停止按钮、超限运行防止装置、前面光电开关、超高报警等多重保护装置确保车库安全。

3）制造工艺、技术水平达到国际先进水平，车库整体设计与周围建筑容为一体，美观大方。

（1）双层升降横移式　本设备的上层载车板可作上下升降运动，而下层载车板可作左右横切移运动。由于下层设有一个空位，上层载车板可下降至地面，从而取出上层汽车。地面的下层载车板上的汽车则不需任何动作，可以直接出车，如图 9-25 所示。其主要技术性能参数见表 9-1。

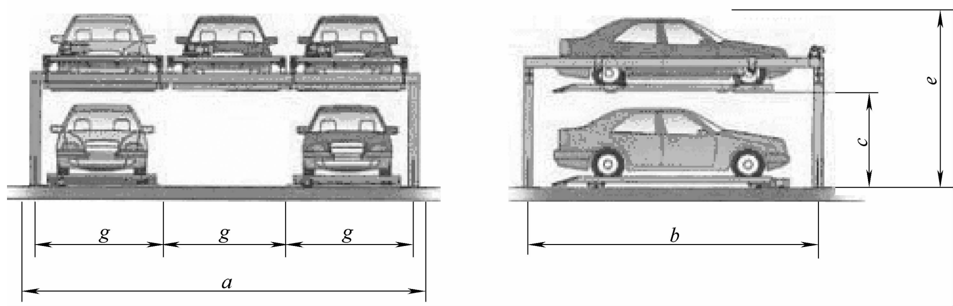



图 9-25　双层升降横移式车库

**表 9-1　主要技术性能参数**

| 停车数 | 见车位布置图 | 上车位 | 下车位 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 适用车辆参数 | 车型 | D（大型） | D（大型） | T（特大型） | 面包车 |
| | 车辆长/mm | ≤5000 | ≤5000 | ≤5300 | ≤5000 |
| | 车辆宽/mm | ≤1850 | ≤1850 | ≤1900 | ≤1850 |
| | 车辆高/mm | ≤1550 | ≤1550 | ≤1550 | ≤2050 |
| | 车辆自重/kg | ≤1700 | ≤1700 | ≤2350 | ≤1850 |

（续）

| 停车数 | 见车位布置图 | 上车位 | 下车位 | |
|---|---|---|---|---|
| 车库容量/mm（见图 9-25） | 车型 | D（大型） | T（特大型） | 下层停面包车 |
| | *a* | 7200 ± 2 | 7200 ± 2 | 7200 ± 2 |
| | *b* | 5695 ± 2 | 5895 ± 2 | 5695 ± 2 |
| | *c* | 1800 | 1800 | 2250 |
| | *e* | ≥3500 | ≥3500 | ≥3900 |
| | *g* | 2400 | 2400 | 2400 |
| 驱动方式 | 电动机，链条 | | | |
| 电动机 | 升降 | 功率/kW | 2.2 | |
| | | 速度范围/（m/min） | 5.4 ~ 6.5 | |
| | 横移 | 功率/kW | 0.2 | |
| | | 速度范围/（m/min） | 6 ~ 7.8 | |
| 操作方式 | 按钮箱、触摸屏、磁卡、上位机（可选）自动、搬运操作 | | | |
| 电源 | 3 相 380V 50Hz | | | |
| 平均存取时间/s | ≤50 | | | |

（2）三层升降横移式　该停车设备的出入口在第一层。中层台板既可作升降运动，又可进行横移运动。上层台板只可以作升降运动，而下层台板则仅可以作横移动作。通过中层和下层的空位，利用台板运动变换空位，将汽车下降至第一层，从而取出汽车。第一层的汽车可直接开出，无需倒车，如图 9-26 所示。其主要技术性能参数见表 9-2。

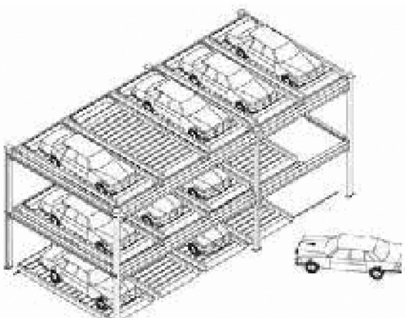
**表 9-2　主要技术性能参数**

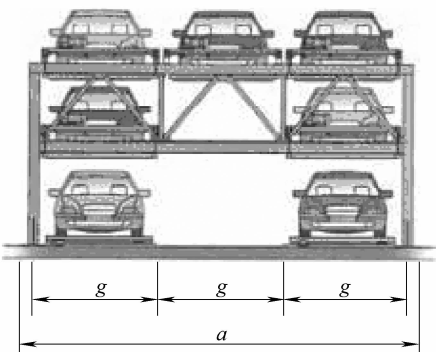
| 停车数 | 见车位布置图 | 上车位 | 下车位 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 适用车辆参数 | 车型 | D（大型） | D（大型） | T（特大型） | 面包车 |
| | 车辆长/mm | ≤5000 | ≤5000 | ≤5300 | ≤5000 |
| | 车辆宽/mm | ≤1850 | ≤1850 | ≤1900 | ≤1850 |
| | 车辆高/mm | ≤1550 | ≤1550 | ≤1550 | ≤2050 |
| | 车辆自重/kg | ≤1700 | ≤1700 | ≤2350 | ≤1850 |
| 车库容量/mm（见图 9-26） | 车型 | D（大型） | T（特大型） | | 下层停面包车 |
| | *a* | 7350 ± 2 | 7350 ± 2 | | 7350 ± 2 |
| | *b* | 5895 ± 2 | 5895 ± 2 | | 5895 ± 2 |
| | *e* | 5845 | 5845 | | 5845 |
| | *h* | 4000 | 4000 | | 4428 |
| | *c* | 1800 | 1800 | | 2250 |
| | *g* | 2480 | 2450 | | 2480 |

（续）

| 停车数 | 见车位布置图 | 上车位 | 下车位 |
|---|---|---|---|
| 驱动方式 | 电动机（链条） | | |
| 电动机 | 升降 | 功率/kW | 2.2 |
| | | 速度/（m/min） | 6.5 |
| | 横移 | 功率/kW | 0.2 |
| | | 速度/（m/min） | 8.0～9.0 |
| 操作方式 | 按钮箱、触摸屏、磁卡、上位机（可选）自动、手动操作 | | |
| 电源 | 3 相 380V 50Hz | | |
| 平均存取时间/s | ≤60 | | |







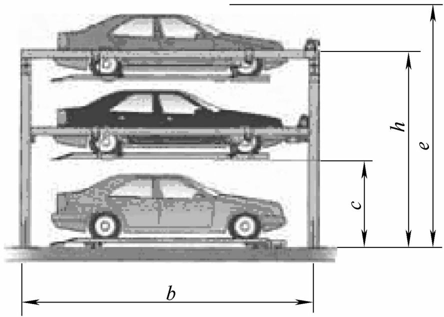




图 9-26　三层升降横移式车库

## 2. 巷道堆垛式

巷道堆垛式立体车库采用堆垛机作为存取车辆的工具，所有车辆均由堆垛机进行存取，因此对堆垛机的技术要求较高。单台堆垛机成本较高，所以巷道堆垛式立体车库适用于车位数需要较多的客户使用，如图 9-27 所示。

## 3. 垂直提升式立体车库

垂直提升式立体车库类似于电梯的工作原理。在提升机的两侧布置车位，一般地面需一个汽车旋转台，可省去司机调头。垂直提升式立体车库一般高度较高（几十米），对设备的安全性，加工安装精度等要求都很高，因此造价较高，但占地却最小。



图 9-27　堆垛式立体车库

**4. 垂直循环式**

其主要特点是占地少，两个泊位面积可停 6～10 辆车。外装修可只加顶棚，消防可利用消防栓。价格低，地基、外装修、消防等投资少，建设周期短。可采用自动控制，运行安全可靠。

## 9.5.2　车库设置及机械执行系统

某车库内部设置如图 9-28 所示。库位为地下 4 层钢筋混凝土结构，其中靠近地面的 1 层为面包车车位，其余为轿车车位。停车位上没有任何传动机构及电气系统，所有存取动作均由独立于库位的机械执行系统完成。车位设计成重列布置，巷道两侧各有两个并列的车位，这样可使车库的容量提高一倍。

机械执行系统包括堆垛机、智能搬运小车（AGV）及卷帘门、转盘等辅助设备，负责完成进车和取车的连续动作。其中堆垛机完成层、列两个方向的运动，智能搬运小车在库位与堆垛机之间进行车辆搬运。地上部分有两个出入口，可允许两辆车同时进车或一取一存。进车和出车时由出入口内的转盘进行车辆转向。安装在转盘上的履带可在进车时对车辆的横向位置进行调整。

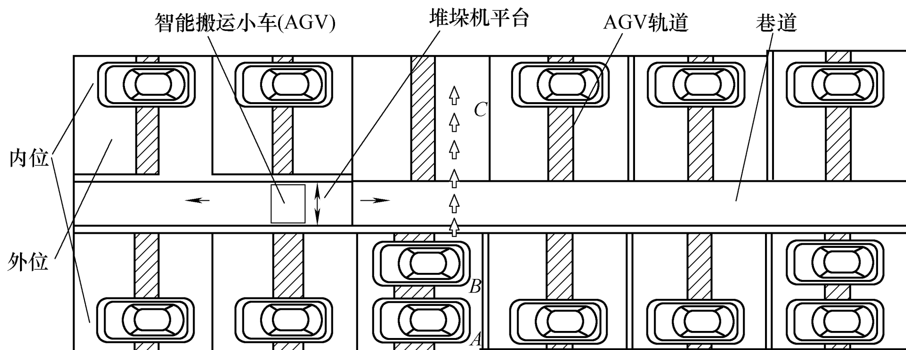



图 9-28　单层车库俯视简图

## 9.5.3　控制系统

按照上层任务与底层控制相分离的原则，控制系统分为如图 9-29 所示的层次。各计算机之间通过局域网相连，上位机负责任务的分配、车库数据库的管理及设备状态的显示，管理员可通过上位机对存取车任务进行干预。服务器对用户的刷卡请求作出响应，并担负上位机、激光检测系统与底层可编程控制器（PLC）之间通信的任务。由于服务器在系统中处于承上启下的地位，且其上连接的端口较多，因此它在正常运行时不配备键盘和鼠标等交互设备，以避免由于外设的请求造成机器死机等故障而中断系统运行。激光检测系统在进车和出车时对出入口转盘上的车辆进行检测分析，给出车辆位置姿态的调整命令或有无车的判断信息。车牌识别系统在进车时对车牌号码进行拍摄，通过识别软件将图形转化为文本信息，并上传至上位机存入数据库，确保车辆信息的完整和准确。服务器与主控 PLC 间使用串行通信方式，由于堆垛机和搬运小车为运动设备，无法进行有线连接，故根据实际情况，主控 PLC 与堆垛机 PLC、堆垛机 PLC 与小车 PLC 之间分别选用了红外和无线模块进行通信。各 PLC 接收其上级下发的命令，完成属于本级的控制操作，并发送属于下级 PLC 的任务，同时对设备状态进行逐级上传，供服务器和上位机进行任务处理和状态显示。除以上各部分外，系统还为上位机配备了热备份机，在上位机出现死机等异常情况时，能够迅速地接替其工作，保持记录数据的完整性。

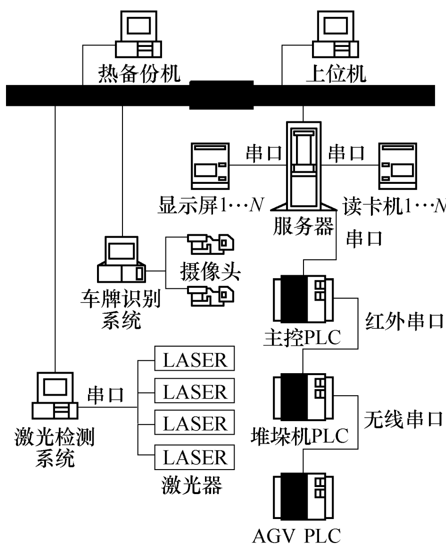


图 9-29　控制系统结构图

## 9.5.4　信息管理系统

根据上述结构，上位机的信息管理系统担负着人机交互、数据维护、任务分配、状态监视等方面的任务，其核心是对数据库的操作与维护。

**1. 停车卡管理**

智能车库采用停车卡对用户和车辆进行管理，分为长期卡和临时卡，交由不同的用户使用。卡的信息包括卡号、用户名、卡类别、车牌号、车型、优先级等信息，存放于上位机数据库中。停车卡管理主要是进行卡的发放、回收、查询、挂失等操作。

**2. 车位管理**

车位数据是整个智能车库数据库的主要部分。数据库中的车位信息包括固定信息（坐标、优先级、长宽高几何信息等）和当前状态信息（有无车，是否正在操作，所停车的卡号、车牌号等）。这些信息是系统分配车位、下发任务的依据。系统须根据底层上传的状态信息及时更新车位数据库，以保持数据库与实际库位的一致性。系统中还

配有车牌识别软件，能在车辆存入时向上位机上传车牌号码，该车牌号码与用户卡号等信息一同记入数据库中形成完整车辆信息。

**3. 任务管理**

由于机械系统只能按部就班地执行各项操作，而用户的存取请求是随机的，因此必须建立安全有效的任务管理机制。关于在哪个控制层次建立任务队列，有 3 种不同的方案。一是在主控 PLC，二是在服务器，三是在上位机。3 种方案从理论上均可以实现任务队列的管理，且在实际使用的程序中 3 个层次上也都建有任务队列，但系统的任务管理职能放在上位机上符合分层控制的原则。在上位机中，用户每一次刷卡请求均会被纳入系统的任务管理。对于有效的刷卡请求，系统将其正式排入任务队列，任务队列也以表的形式存放在数据库中，待机械系统处于待机状态时将任务依次下发。在任务执行过程中，上位机按照底层上传的状态信息随时修改数据库中该任务的状态标志，使其与底层的流程保持一致。对于无效的刷卡请求（如车不在库内而要求取车），系统只进行记录而不生成新的任务，同时会给出相应的错误提示。

**4. 车位和系统软硬件状态的显示及处理**

上位机是整个系统中唯一的人机交互接口，所以在信息管理系统中设计了软硬件运行状态的显示功能，便于管理员对系统进行监视，直观地发现问题。状态显示依据来自主控 PLC 经服务器上传的状态信息，包括堆垛机、AGV、主控 PLC 及其相互间通信的状态。另外对一些人为的简单流程错误（如刷卡错误、车辆超标）进行提示和处理。同时这些信息也是上位机对任务状态进行跟踪和管理的依据。

**5. 手动操作**

智能车库在正常状态下为全自动运行，无需人为干预，但遇到故障或有特殊要求时仍需要有手动操作。在设备没有整体性硬故障的前提下，手动操作功能可以下发基本的存取车指令。

**6. 操作历史记录及数据备份**

对数据库（包括车位、停车卡、任务）的任何操作及所出现的故障都会自动记录到日志文件中，以备人工查阅及故障恢复。系统具备一定的故障恢复能力，在死机、停电等故障后能够确保数据的一致性，故障前未完成的任务仍有记录，系统重新启动时将会有相应的提示信息。此外系统中还为上位机配备了热备份机，上位机上的所有数据在热备份机上随时进行备份，一旦上位机发生故障，热备份机能够立即启动以支持系统运行。

## 9.6　发卡器

作为一种自动发卡机构的发卡器是光机电一体化的高科技型产品。它严格按工业级标准设计生产，是专门针对智能停车场收费管理系统性能需求而设计：预留射频卡天线安装位置；具有回收卡片的功能；可以连接车辆检测（地感）信号，实现连动控制。

### 9.6.1　发卡器的机构组成

发卡器主要由卡箱、分卡机构、送卡机构和回收机构等四部分组成。并提供多种尺寸的标准卡箱供客户选择，以满足用户不同的需求。发卡器结构如图9-30所示。

### 9.6.2　发卡器的工作原理

TCD-300发卡器机构利用安装在卡箱底部的摩擦轮将卡片分离，然后将卡片经送卡机构送至发卡器前端（此时卡片被压卡片压住）等候用户取卡。发卡器具有回收功能，此时主机可以发出收卡命令将卡回收。如果发卡器3分钟内没有收到回收命令且卡片未被取走，发卡器会将卡片收回至回收仓。

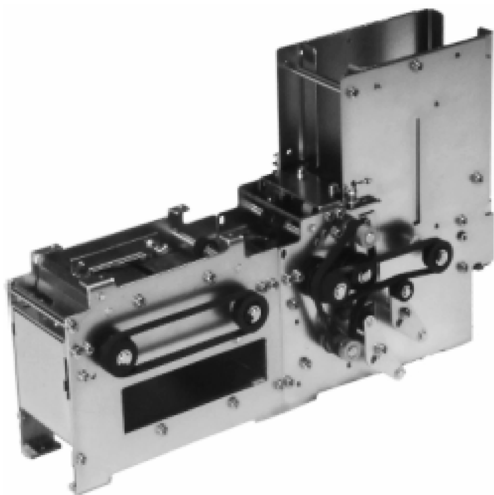


图9-30　发卡器

出卡通道上的红外接近传感器可以检测到卡箱是否有卡和出卡通路是否阻塞（或出卡口的卡是否被取走）。当卡箱有卡且出卡通道无阻塞时，发卡器输出“准备好”信号。如果发卡器不能正常分卡，发卡器会使电动机反转将卡片进行适当整理，然后再正转摩擦分卡，如此最多重复五次。如果五次后发卡器仍未成功分卡，发卡器会进入出错状态，此时需人工排除故障。故障排除后由控制主机输出“清除错误”信号清除出错状态。TCD-300发卡器工作原理方框图如图9-31所示。

## 9.7　自动化立体仓库

如图9-32所示的自动化立体仓库是采用高层货架存放货物，以巷道堆垛起重机为主，结合入库出库周边设备来进行作业的一种仓库。它把计算机与信息管理和设备控制集成起来，按照控制指令自动完成货物的存取作业，并对库存货物进行管理。

自动化立体仓库是现代物流系统中迅速发展的一个重要组成部分，它具有节约用地、减轻劳动强度、消除差错、提高仓储自动化水平及管理水平、提高管理和操作人员素质、降低储运损耗、有效地减少流动资金的积压、提高物流效率等优点。自动化立体仓库的功能从单纯的物资储存保管，扩展到物品的接受、分类、计量、包装、分拣、配送等多种功能。

### 9.7.1　自动化立体仓库的组成

图9-33所示的自动化立体仓库系统，主要由库房、堆垛机、货架、AGV、传输设备、存储设备、控制和管理系统等部分组成。

**1. 堆垛机**

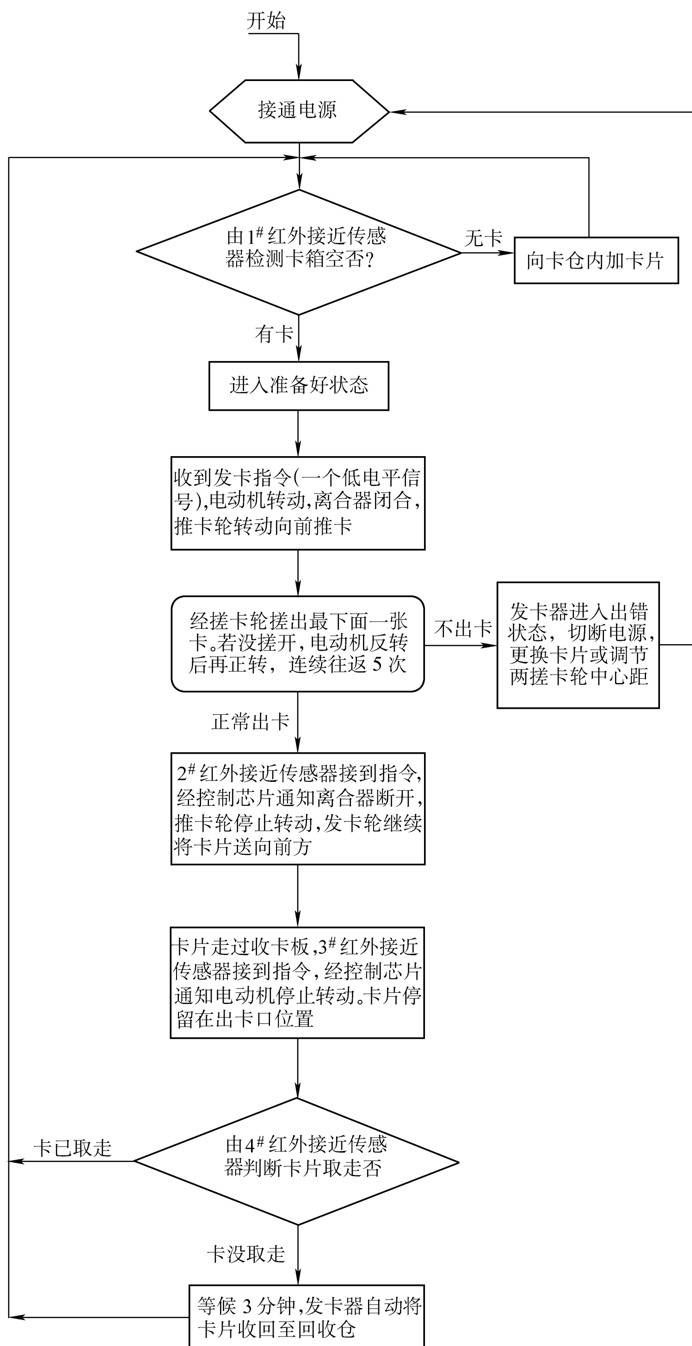



图 9-31　TCD-300 发卡器工作原理方框图

堆垛机是立体仓库内部的搬运设备。堆垛机可采用有轨或无轨方式，其控制原理与运输小车相似。仓库高度很高的立体仓库常采用有轨堆垛机。为增加稳定性，采用

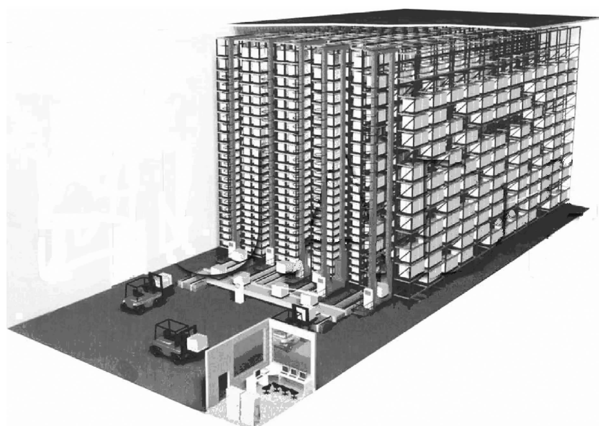


图 9-32　自动化立体仓库

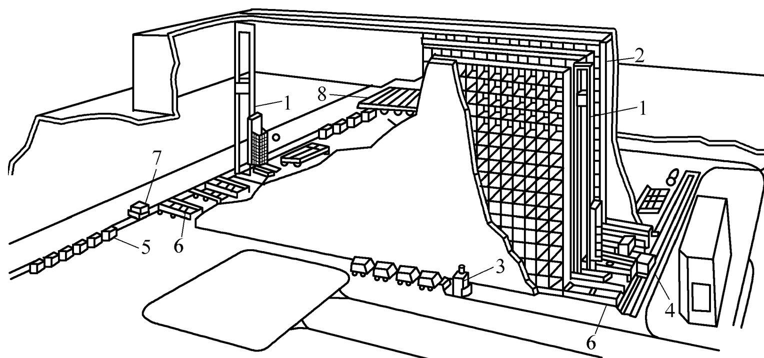



图 9-33　自动化立体仓库的组成

1—堆垛机　2—高层货架　3—场内　4—场内 AGV　5—中转货位

6—出入库传送滚道　7—场外 AGV　8—中转货场

两条平行导轨，即天轨和地轨，如图 9-34 所示。堆垛机的运动有沿巷道的水平移动、升降台的垂直上下升降和货叉的伸缩。堆垛机上有检测水平移动和升降高度的传感器，辨认货物的位置，一旦找到需要的货位，在水平和垂直方向上制动，货叉将货物自动推入货格，或将货物从货格中取出。

**2. 巷道转轨车**

巷道转轨车的主要用途是将堆垛机从一巷道转入另一巷道，主要适用于出入库频率低并有三个巷道以上的仓库，如图 9-35 所示。

**3. 库内输送设备**

库内输送设备由链条输送机、辊子输送机、升降台穿梭小车、托盘码拆机、外型检测装置、自动称重装置及出入库台等辅助设备组成，如图 9-36 所示。

**4. 货架**

货架主要用于以托盘、货箱为载体的物料的储存。货架可分为组合横梁式、焊接

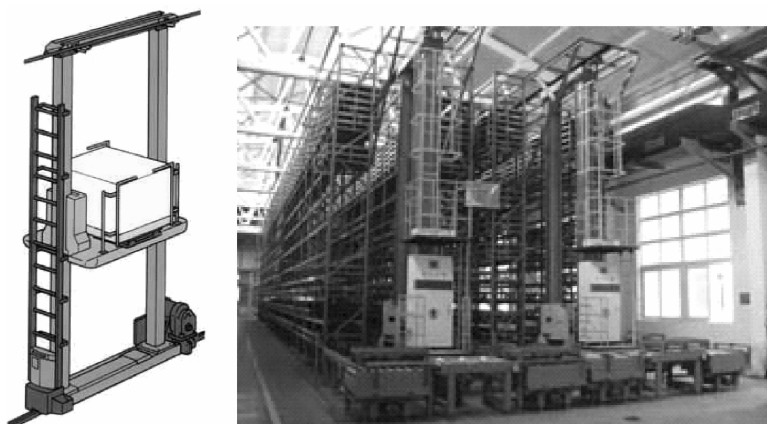


图 9-34　堆垛机



图 9-35　巷道转轨车



图 9-36　库内输送设备

牛腿式、隔板式、悬臂式和重力式，如图 9-37 所示。

**5. AGV**

如图 9-38 所示的自动导向小车（Automatic Guide Vehicle，AGV）是一种无人驾驶的以蓄电池驱动的物料搬运设备，它通常由运输小车、地下电缆和控制器三部分组成，小车由蓄电池提供动力，沿着埋没在地板槽内的用交变电流激磁的电缆行走，地板槽埋没在地下 4cm 左右深处，地沟用环氧树脂灌封，形成光滑的地表，以便清扫和维护。导向电缆铺设的路线与车间工件的流动路线及仓库的布局相适应，AGV 行走的路线一般可分为直线、分支、环路或网状。

为了实现工件的自动交接，小车装有托盘交换装置，以便与机床或装卸站之间进行自动联接。交换装置可以是辊轮式，利用辊轮与托盘间的摩擦力将托盘移进移出，这种装置一般与辊式传送带配套。交换装置也可以是滑动叉式，它利用往复运动的滑动叉将托盘推出或拉入，两边的支承滚子是为了减少移动时的摩擦力。升降台式交换



图 9-37　货架

装置是利用升降台将托盘升高，物料托架上的托物叉伸入托盘底部，升降台下降，托物叉回缩，将托盘移出。托盘移入的工作过程则相反。小车还装有升降对齐装置，以便消除工件交接时的高度差。




图 9-38　自动导向小车 AGV

**6. 计算机监控和管理系统**

计算机监控系统是自动化立体仓库系统的重要组成部分，其主体由监控软件、监控计算机、网络接口、大屏幕显示器和巷道 LED 显示器组构成。通过网络接口与网络服务器、管理系统、堆垛机控制系统、出入库控制系统进行数据交换，实现对立体仓库自动化设备的运行数据采集、作业调度和监督控制，使控制设备能够根据系统要求高效、准确和可靠地工作，实现货物的自动存储及发送。自动化立体仓库计算机监控管理系统结构图如图 9-39 所示。

## 9.7.2　自动化立体仓库的类型

**1. 按照储存物品的特性进行分类**

1）常温自动化立体仓库系统。

2）低温自动化立体仓库系统。

3）防爆型自动仓储系统。

**2. 按照自动化立体仓库建筑形式进行分类**

1）分离式钢架仓储系统。

2）一体式钢架仓储系统。

**3. 按照自动化立体仓库设备形式进行分类**

1）单位负载式自动化立体仓库。

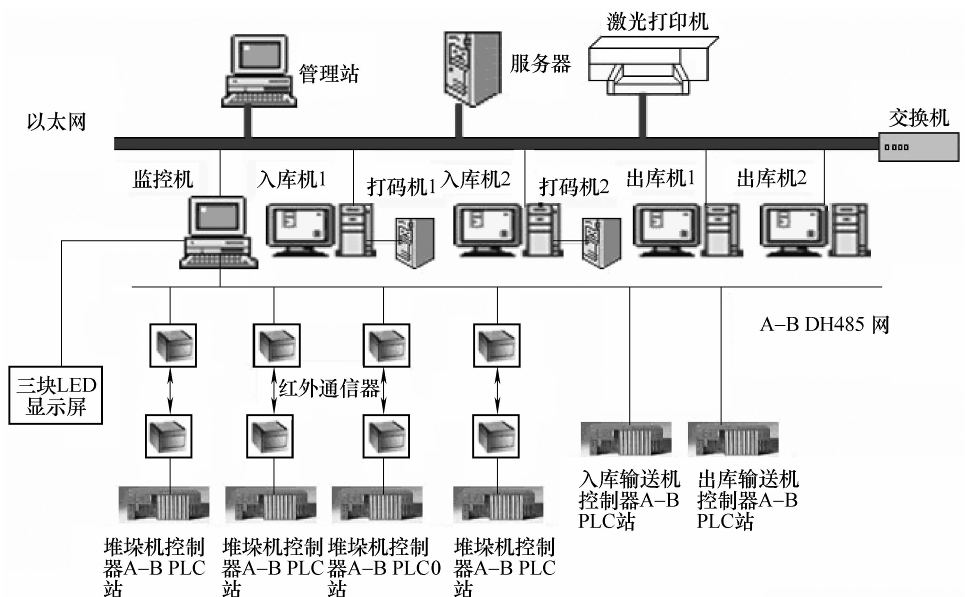



图 9-39　自动化立体仓库计算机监控管理系统结构图

2）开放式钢架自动化立体仓库。

3）封闭式钢架自动化立体仓库。

4）推回式钢架自动化立体仓库。

5）重力式钢架自动化立体仓库。

6）水平式钢架子母车系统。

**4. 按照立体仓库的高度分类**

1）低层立体仓库（高度 <5m）。

2）中层立体仓库（高度在 5 ~ 15m 之间）。

3）高层立体仓库（高度 >15m）。

## 9.7.3　自动化立体仓库的特点

1）仓库作业全部实现机械化和自动化，货位集中，便于控制与管理，特别是使用电子计算机，不但能够实现作业过程的自动控制，而且能够进行信息处理，提高了仓库管理水平。

2）采用高层货架、立体储存，能有效地利用空间，减少占地面积，降低土地购置费用。据国际仓库自动化会议资料，以库存 11000 托盘、月吞吐 10000 托盘的冷库为例，自动化立体仓库的用地面积为普通仓库的 13%、工作人员为普通仓库的 21.9%、吞吐成本为普通仓库的 55.7%、总投资为普通仓库的 63.3%。立体仓库的单位面积储存量为普通仓库的 4 ~ 7 倍。

3）采用托盘或货箱储存货物，货物的破损率显著降低。

4）优化、降低库存，缩短周转期，节约资金。

### 9.7.4　自动化立体仓库的管理与控制

自动化立体仓库实现仓库管理自动化和出入库作业自动化。仓库管理自动化包括对账目、货箱、货位及其他信息的计算机管理。出入库作业自动化包括货箱零件的自动识别、自动认址、货位状态的自动检测，以及堆垛机各种动作的自动控制等。

（1）货物的自动识别与存取　货物的自动识别是自动化仓库运行的关键，货物的自动识别通常采用编码技术，对货格和货箱进行编码，条形码贴在货箱或托盘的适当部位，当货箱通过入库传送滚道时，用条形码扫描器自动扫描条形码并译码，将货箱零件的有关信息自动录入计算机。

（2）计算机管理　自动化仓库的计算机管理包括物资管理、账目管理、货位管理及信息管理。入库时将货箱合理分配到各个巷道作业区，出库时按“先进先出”原则，或其他排队原则。系统可定期或不定期地打印报表，并可随时查询某一零件存放的位置。

（3）计算机控制　自动化仓库的控制主要是对堆垛起重机的控制。堆垛起重机的主要工作是入库、搬库和出库。从控制计算机得到作业命令后，屏幕上显示作业的目的地址、运行地址、移动方向和速度等，并显示伸叉方向及堆垛机的运行状态。控制系统具有货叉占位报警、取箱无货报警、存货占位报警等功能。

## 9.8　网络摄像机

网络摄像机是传统摄像机与网络视频技术相结合的新一代产品，除了具备一般传统摄像机所有的图像捕捉功能外，机内还内置了数字化压缩控制器和基于 WEB 的操作系统，使得视频数据经压缩加密后，通过局域网、互联网或无线网络送至终端用户。网络摄像机的应用，使得图像监控技术有了一个质的飞跃。第一，网络的综合布线代替了传统的视频模拟布线，实现了真正的三网（音频、视频、数据）合一，网络摄像机即插即用，工程实施简便，系统扩充方便；第二，跨区域远程监控成为可能，特别是利用互联网，图像监控已经没有距离限制，而且图像清晰，稳定可靠；第三，图像的存储、检索十分安全、方便，可异地存储、多机备份存储，以及快速非线性查找等。图 9-40 为典型的网络摄像机在视频监控中的应用拓扑图。

### 9.8.1　网络摄像机的组成

网络摄像机一般由镜头、图像传感器、声音传感器、A/D 转换器、图像与声音编码器、控制器、网络视频服务器、外部报警、控制接口等部分组成。图 9-41 为网络摄像机的内部结构图。

1）镜头。镜头作为网络摄像机的前端部件，有固定光圈、自动光圈、自动变焦、自动变倍等种类，与模拟摄像机相同。

2）图像传感器。图像传感器有 CMOS 和 CCD 两种模式。CMOS 主要是利用硅和锗这两种元素所做成的半导体，通过 CMOS 上带负电和带正电的晶体管来实现基本的功

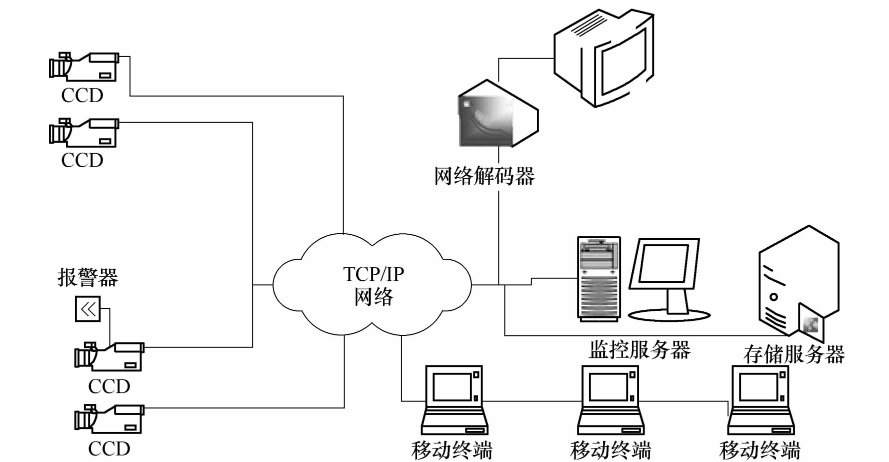



图 9-40　典型网络摄像机在视频监控中的应用拓扑图

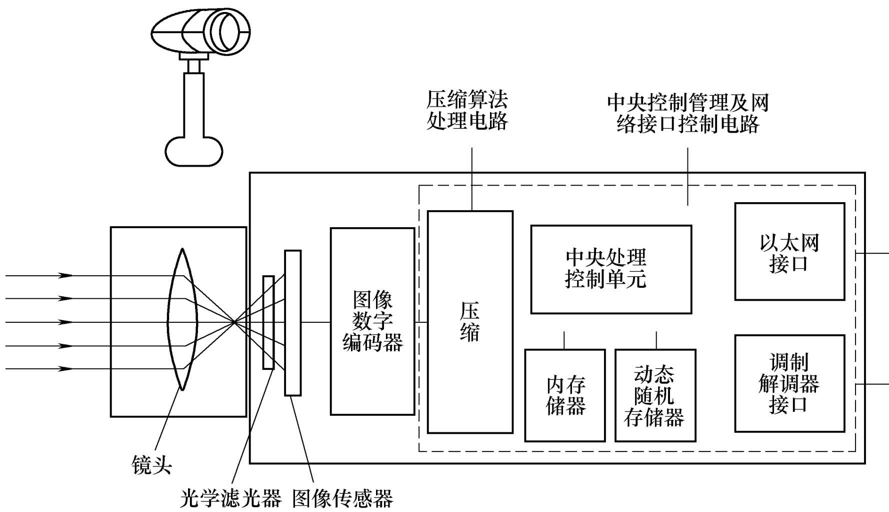



图 9-41　网络摄像机的内部结构图

能。这两个互补效应所产生的电流即可被处理芯片记录和解读成影像。CMOS 的耗电量只有普通 CCD 的 1/3 左右，但当 CMOS 在处理快速变换的影像时，由于电流变换过于频繁而过热。暗电流抑制得好就问题不大，如果抑制不好时容易出现杂点。CCD 图像传感器由在单晶硅基片上呈二维排列的光敏二极管及其传输电路构成。光敏二极管把光转化成电荷，再经转化电路传送和输出。通常，传送优良图像质量的设备都采用 CCD 图像传感器，而注重功耗和成本的产品则选择 CMOS 图像传感器。但新的技术正在克服每种器件固有的弱点，同时保留了适合于特定用途的某些特性。这一部分与模拟摄像机相同。

3）声音传感器。声音传感器即传声器或称送话器，与传统的传声器原理一样。

4）A/D 转换器。A/D 转换器的功能是将图像和声音等模拟信号转换成数字信号。

基于 CMOS 模式的图像传感器模块有直接数字信号输出的接口，无须 A/D 转换器；而基于 CCD 模式的图像传感器模块如有直接数字输出的接口，亦无须 A/D 转换器，但由于此模块主要针对模拟摄像机设计，只有模拟输出接口，故需要进行 A/D 转换。

5）图像与声音编码器。经 A/D 转换后的图像、声音数字信号，按一定的格式或标准进行编码压缩。编码压缩的目的是为了便于实现音/视信号与多媒体信号的数字化，便于在计算机系统、网络及万维网上不失真地传输上述信号。目前，图像编码压缩技术有两种，一种是硬件编码压缩，即将编码压缩算法固化在芯片上；另一种是基于 DSP 的软件编码压缩，即软件运行在 DSP 上进行图像的编码压缩。同样，声音的压缩亦可采用硬件编码压缩和软件压缩，其编码标准有 MP3 等格式。

6）控制器。控制器是网络摄像机的心脏，它肩负着网络摄像机的管理和控制工作。如果是硬件压缩编码，控制器是一个独立部件；如果是软件编码压缩，控制器是运行编码压缩软件的 DSP，即二者合二为一。

7）网络视频服务器。网络视频服务器提供网络摄像机的网络功能，它采用了 RTP/RTCP、UDP、HTTP、TCP/IP 等相关网络协议，允许用户从自己的 PC 机使用标准的浏览器根据网络摄像机的 IP 地址对网络摄像机进行访问，观看实时图像，以及控制摄像机的镜头和云台。

8）外部报警、控制接口。网络摄像机为工程应用提供了实用的外部接口，如控制云台的 485 接口，用于报警信号输入输出的 I/O 口。如红外探头发现有目标出现，发报警信号给网络摄像机，网络摄像机自动调整镜头方向并实时录像；另一方面，当网络摄像机侦测到有移动目标出现时，亦可向外发出报警信号。

## 9.8.2 图像的编码标准

目前，网络摄像机的图像压缩编码标准主要有 MPEG4、H. 263、H. 264、M-JPEG 等。

IP 网络摄像机采用的压缩方式大致可以分为 H. 263、M-JPEG、MPEG1、MPEG2、MPEG4 及 Wavelet 等几种。从功能上看，IP 网络摄像机分为没音频的和有音频的几种。基于 IP 网络摄像机价位和传统模拟监控系统改造的考量，远端监控的另一类似解决方案是以一个普通摄像机加一个网络摄像机服务器（Video server）来代替一个 IP 网络摄像机的功能。网络摄像服务器，也称为视频网关或视频服务器，它内建 Web server，是一个采用嵌入式操作系统的专用网络视音频接入设备，提供通过标准浏览器即时监控影像的解决方式。

MPEG4 压缩方式及其模块的 IP 网络摄像机 M-CAM，它的主要原理是内置一个嵌入式 Web server。网络上用户可以用浏览器（如 Microsoft IE 或 Netscape）观看 Web server 上的摄像机图像，授权用户还可以控制摄像机云台镜头的动作或对系统配置进行操作。同时还具有报警输入输出功能。

MPEG4 中 M-JPEG 等压缩方式在互联网上传输的图像品质较好，比较适用于网络系统，它是时下客户普遍可以接受的压缩方式。

# 9.9　数码相机

数码相机是介于普通相机和扫描仪之间的产物，是数字时代的一个重要标志，如图 9-42 所示。数码相机集光学技术、传感技术、微电子技术及计算机技术和机械技术的优势于一体，采用光电转换器件，将光信息转换成电信息，再加以特定处理并进行存储，是一个典型的光机电一体化产品。至今已成为数码影像领域中深受世人瞩目的主流产品之一。



图 9-42　数码相机

## 9.9.1　数码相机的组成

数码相机是由镜头、图像传感器、A/D（模/数转换器）、MPU（微处理器）、内置存储器、LCD（液晶显示器）、PC 卡（可移动存储器）和接口（计算机接口、电视机接口）等部分组成，其结构示意图如图 9-43 所示。

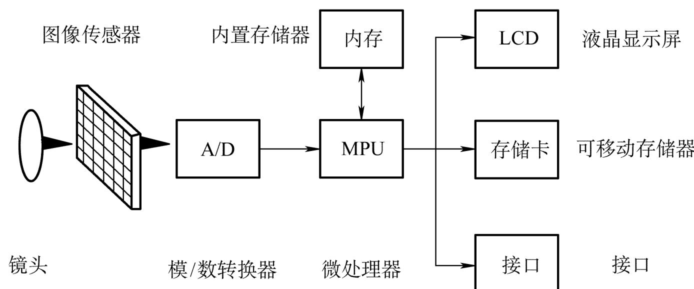



图 9-43　数码相机结构示意图

数码相机中只有镜头的作用与普通相机相同，它将光线会聚到感光器件 CCD（电荷耦合器件）上。CCD 是半导体器件，它代替了普通相机中胶卷的位置，它的功能是把光信号转变为电信号。这样，我们就得到了对应于拍摄景物的电子图像，但是它还不能马上被送去计算机处理，还需要按照计算机的要求进行从模拟信号到数字信号的转换，ADC（模数转换器）器件用来执行这项工作。接下来 MPU（微处理器）对数字信号进行压缩并转化为特定的图像格式，如 JPEG 格式。最后，图像文件被存储在内置存储器中。至此，数码相机的主要工作已经完成，剩下要做的是通过 LCD（液晶显示器）查看拍摄到的照片。有一些数码相机为扩大存储容量而使用可移动存储器，如 PC 卡或者软盘。此外，还提供了连接到计算机和电视机的接口。数码相机要实现测光、运算、曝光、闪光控制、拍摄逻辑控制及图像的压缩处理等操作必须有一套完整的控制体系。数码相机通过 MPU（Microprocessor Unit）实现对各个操作的统一协调和控制。

**1. 镜头**

数码相机有变焦镜头和定焦镜头之分，在数码相机应用的镜头中，其电子控制电路已经完全和数码相机的核心处理单元（微处理器）紧密地联系起来。

**2. 图像传感器**

图像传感器是数码相机的核心部件，其质量决定了数码相机的成像质量。图像传感器的体积通常很小，但却包含了几十万乃至上千万个具有感光特性的二极管——光敏二极管，每个光敏二极管即为一个像素。当有光线照射时，这些光敏二极管就会产生电荷累积，光线越多，电荷积累的就越多，然后这些积累的电荷就会被转换成相应的图像数据。

目前用于数码相机的图像传感器有两种：一种为电荷耦合器件（Charge Coupled Device，CCD）；另一种为互补金属氧化物半导体（Complementary Metal Oxide Semiconductor，CMOS）。从信息的读取方式上看，CCD 存储的电荷信息，需在同步信号控制下一位一位地实施转移后读取，电荷信息转移和读取输出需要有时钟控制电路和三组不同的电源相配合，整个电路较为复杂。CMOS 光电传感器经光电转换后直接产生电流（或电压）信号，信号读取十分简单；从速度上看，CCD 需在同步时钟的控制下，以行为单位一位一位地输出信息，速度较慢，而 CMOS 采集光信号的同时就可以取出电信号，还能同时处理各单元的图像信息，速度比 CCD 电荷耦合器快很多；从电源及耗电量上看，CCD 电荷耦合器大多需要三组电源供电，耗电量较大，而 CMOS 光电传感器只需使用一个电源，耗电量很小，仅为 CCD 的 1/8～1/10；从成像质量上看，CCD 制作技术起步早，技术成熟，采用 PN 结或二氧化硅（$SiO_2$）隔离层隔离噪声，成像质量相对 CMOS 光电传感器有一定优势。由于 CMOS 光电传感器集成度高，各光电传感元件、电路之间距离很近，相互之间的光、电、磁干扰较严重，噪声对图像质量影响很大，使 CMOS 光电传感器很长一段时间无法进入实用。近年来，随着 CMOS 电路消噪技术的不断发展，为生产高密度优质的 CMOS 图像传感器提供了良好的条件。

**3. A/D 转换器**

A/D 转换器即模拟数字转换器（Analog Digital Converter，ADC）。A/D 转换器有两个重要指标：转换速度和量化精度。由于数码相机系统中高分辨率图像的像素数量庞大，因此对转换速度要求很高。同时，量化精度对应于 A/D 转换器将每一个像素的亮度或色彩值量化为若干个等级，这个等级就是数码相机的色彩深度。对于具有数字化传输接口的图像传感器（如 CMOS），则不需要 A/D 转换器。

**4. MPU（微处理器）**

数码相机要实现测光、运算、曝光、闪光控制、拍摄逻辑控制及图像的压缩处理等操作必须有一套完整的控制体系，数码相机通过 MPU（Microprocessor Unit）实现对各个操作的统一协调和控制。MPU 通过对 CCD 感光强弱程度的分析，调节光圈和快门，又可通过机械或电子控制调节曝光。一般数码相机采用的微处理器模块的系统结构如图 9-44 所示，包括图像传感器数据处理 DSP、SRAM 控制器、显示控制器、JPEG 编码器、USB 等接口控制器、运算处理单音频接口（非通用模块）和图像传感器时钟生成器等功能模块。

**5. 存储设备**

数码相机的存储器是用于保存数字图像数据。存储器可以分为内置存储器和可移动存储器（或称为外置存储器），内置存储器为半导体存储器（芯片），用于临时存储

图像。早期数码相机多采用内置存储器，而新近开发的数码相机更多地使用了可移动存储器。这些可移动存储器通常是 3.5in 软盘、PC（PCMCI A）卡、Compact Flash 卡、Smart Media 卡、CD 盘片、Micro Drive、Memory Stick 及 Click 等中的一种。

**6. LCD**（液晶显示器）

LCD（Liquid Crystal Display）液晶显示屏有三个作用：电子取景器、图片显示和功能菜单显示。LCD 分为两类，即 DSTN LCD（双扫扭曲向列液晶显示器）和 TFT LCD（薄膜晶体管液晶显示器）。数码相机中多数采用 TFT LCD。

**7. 输入输出接口**

数码相机的输入输出接口主要有图像数据存储扩展设备接口、计算机通信接口和连接电视机的视频接口。图像数据存储扩展设备接口主要用于如前所述的存储设备的数据交互。常用的计算机通信接口有串行接口、并行接口、USB 接口和 SCSI 接口。

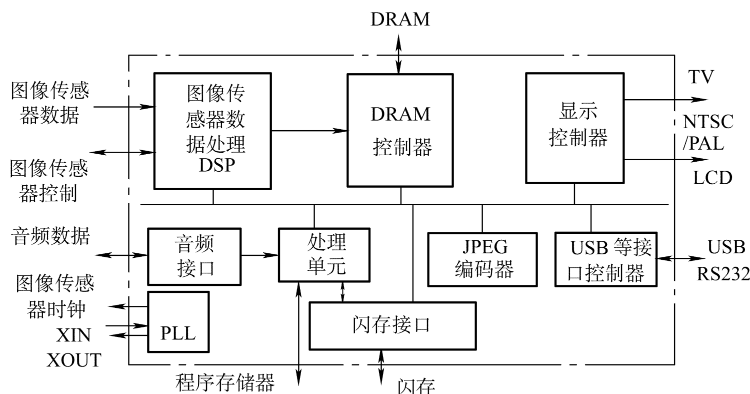



图 9-44　微处理器模块的系统结构

## 9.9.2　数码相机的成像原理

数码相机的工作原理是利用 CCD/CMOS 传感器的感光功能，将光信号转换成电信号，然后经过图像处理器处理后，再将图像保存到存储卡中。与此同时，图像处理器图像信号发送给 LCD 驱动芯片，LCD 驱动芯片将图像信号转换成 LCD 显示屏的驱动信号后，发送给 LCD 显示屏，驱动其将图像显示出来。其工作原理及图像处理过程如图 9-45 所示。

光电转换器件是数码相机的核心部件，目前数码相机的图像传感器主要有 CCD 和 CMOS 两类。CCD 芯片又分为线型和面型两大类，线型 CCD 芯片的最大特点是分辨率很高，可拍摄 1000 万以上像素水平影像的数码相机都采用线型 CCD 芯片。

CCD 器件的基本组成单元是金属—氧化物—半导体（MOS）电容，如图 9-46 所示。在 P 型硅衬底上覆盖二氧化硅绝缘层，在二氧化硅上装配一金属电极，就构成了金属—氧化物—半导体（MOS）电容。

由基本 MOS 单元就可构成 CCD 器件，根据构成方式的不同，CCD 器件可分为线阵和面阵两类。线阵 CCD 是由一维排列的 MOS 单元构成，常见的有 256、512、1024、

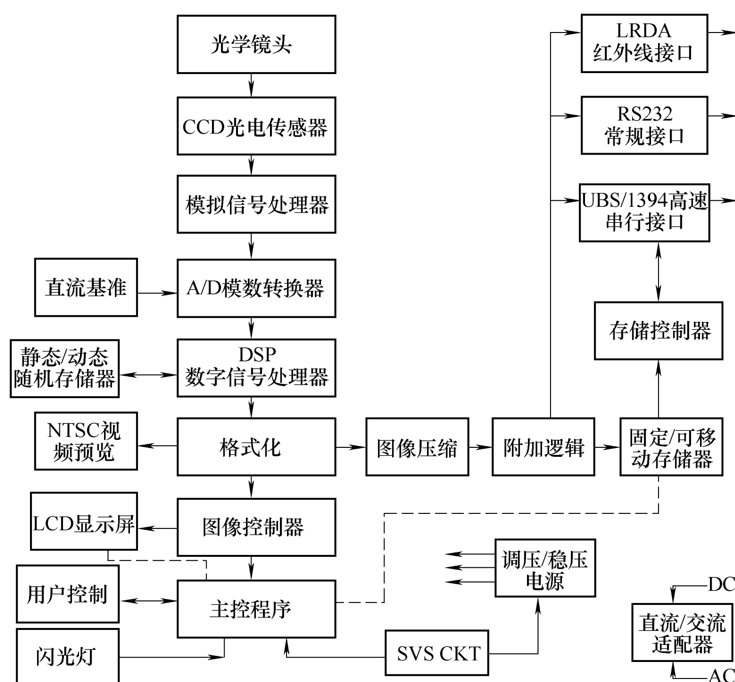



图 9-45　数码相机的成像原理图

2048 等，而面阵 CCD 是由矩阵排列的 MOS 单元的构成，如 512 × 512、1024 × 1024 等。

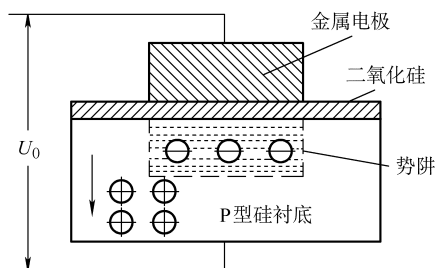



图 9-46　光子入射下的 MOS 电容

CCD 是一种能将光转变为电的半导体器件，它在数码相机中时具有光电转换、电荷贮存及电荷转移三个基本功能。

**1. 电荷贮存功能**

CCD 的一个基本单元如图 9-47 所示，在 P 型半导体衬底上制作一层二氧化硅绝缘层，在绝缘层上再制作一层金属（铝）电极。当我们在电极上加上正偏压时，金属极板带正电荷，P 型半导体中带正电的多数载流子空穴受到极板上正电荷的排斥而远离金属极板，从而在金属极板的下方形成了一个无空穴区，这个区中只有少数载流子电子而带负电，称为耗尽层。金属极板、绝缘层和半导体层，看起来很像一个平行板电容器，它具有电容器贮存电荷的基本功能，而且极板上所加偏

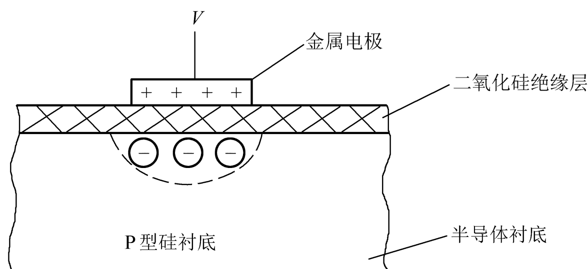



图 9-47　CCD 的基本单元

压越高，它贮存的电荷越多，所以 CCD 具有贮存电荷的功能。

**2. 光电转换功能**

普通电容器的两个极板都是金属导体，而 CCD 的电容有一个极板是半导体。与金属导体内部存在大量自由电子不同，半导体在常温和黑暗环境中基本上是绝缘的，即它的内部可以导电的载流子非常少。但若用光照射半导体衬底时，半导体就会产生大量的电子空穴对，可大大增强其导电性。所以当光照射时，加有偏压的 CCD 电容就能存储许多电荷。实验表明：CCD 的电容在一定偏压下所存储的电荷量与入射光强度成正比，光线越强，存储的电荷就越多。这就实现了 CCD 的光电转换功能。通常 CCD 的单元电容也被称为光敏二极管。

**3. 电荷转移功能**

CCD 实现电荷的转移功能是把 CCD 上的每个电容按一定的方式连接起来。图 9-48 表示的是一种连接方式。为获得电荷转移功能，在每组电容器的电极上分别加上 $V_1$、$V_2$、$V_3$ 时钟驱动脉冲，其波形如图 9-49 所示。

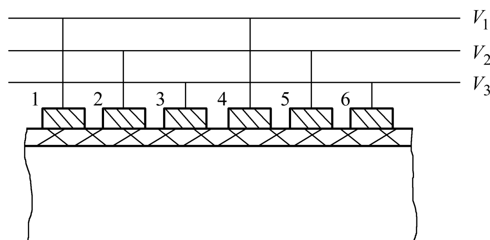



图 9-48　CCD 的一种连接方式

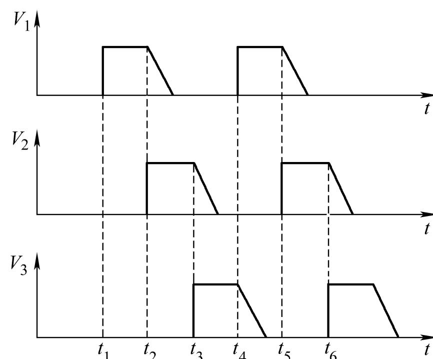



图 9-49　电荷在 CCD 中的转移

假定将 CCD 曝光，产生的电荷图像如图 9-50 所示：1 号电容有 4 单位电荷，4 号电容有 2 单位电荷，其余的电容没有电荷，此时处于 $t = t_1$ 时刻。这时 $V_1$ 为高电平，$V_2$、$V_3$ 为低电平，1 号和 4 号电容接高电平，电极下形成耗尽区，也可以形象化地称为势阱。电荷就落入势阱中，如果我们把电荷比作水，那么势阱就相当于一个水盆。

在时刻 $t_2$，$V_1$、$V_2$ 都是高电平，此时 1 号、2 号及 4 号、5 号电极下都形成势阱，且 1、2 号电容和 4、5 号电容的势阱分别连通到一起，电荷数量未变，电荷在势阱中均匀分布。就与水在水盆中的情况相似，如图 9-50b 所示。

在时刻 $t_3$，$V_1$、$V_3$ 为低电平，$V_2$ 为高电平。1 号、4 号电容因处于低电平。所以它们的势阱消失，只有 2 号、5 号电容处于高电平，其势阱仍然保留，所以电荷就保留到 2 号、5 号电容的势阱中了，电荷数量仍然不变，如图 9-50c 所示。

为了存储电荷和转移电荷，CCD 必须有金属电极和连线，但是因为它们的阻光作用又会降低光电转换效率。解决这个矛盾的方法有两种：一是将电极和连线作成透明的；另一个方法是将衬底做薄一点，从背面进行光照。

## 9.9.3 数码相机的数据处理

数码相机各部分的有机连接，还需要一个针对数据的处理机制。这一数据处理的过程以微处理器（MPU）为中心，通过针对数码相机数据的处理，使得数码相机的各个部分有效地结合在一起。如图 9-51 所示，数码相机的数据流向从图像传感器开始，止于图像数据的存储和传输。根据数码相机系统中采用图像传感器类型的不同（CCD 或 CMOS），数据流的处理有一些差异。在采用 CCD 的数码相机系统中，CCD 数据是模拟数据输出，需要经过模数转换和光学黑电平钳位等处理过程。在采用 CMOS 的数码相机系统中，由于 CMOS 器件采用了数字数据接口，处理 CCD 模拟接口的电路被省略，直接进行数据读出。图像传感器的图像数据被读出后，系统将对其进行针对镜头的边缘畸变的运算修正，然后经过坏像素处理后，被系统送去进行白平衡处理。由于图像传感器在制造和使用老化过程中会出现一些个别的像素点性能偏离或不能正常感光的现象，这些像素点被称为坏像素。为了不对图像产生影响，数码相机的核心处理器通常会通过相应的数学算法（例如插值）进行修正，但这一修正过程是有限的。

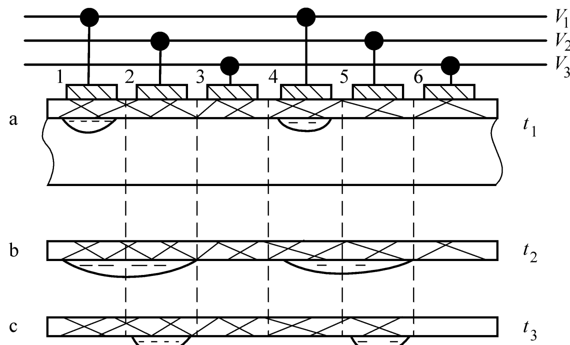


图 9-50 电荷在 CCD 中的转移

伽马校正和色彩合成处理是使数码相机获得良好的彩色图像的必要的图像处理过程。在没有进行色彩合成以前，数码相机获得的图像数据是由红色、绿色和蓝色三通道的图像数据构成，经过色彩合成处理后，将获得彩色的混合图像。

为了能够进行针对镜头的自动对焦控制，在色彩合成处理后，需要针对图像进行边缘检测（锐度检测）和伪彩色检测（伪彩色抑制）。之后，用于浏览的图像数据流被送至 LCD 控制器，需要存储的图像数据被进行 JPEG 压缩后存入存储器中。至此，整个数码相机的图像数据处理完成。为了让数码相机系统稳定地工作，在整个系统中还需要具有一个系统状态的检测控制电路，其主要用于检测供电系统的运行状况和各部分用户接口的运行状态。

## 9.9.4 数码相机的特点

1）拍摄方便，传递快捷。数码相机的机体机型通常比传统相机更小巧、更轻便，而且存储卡的容量大，可达 4G 和 8G，可拍摄高品质的照片几千张。数码相机的最大优势在于它的信息数字化，由于数字信息可以借助遍及全球的数字通信网即时传送，所以数码相机首先可以实现图像的实时传递。

2）即时显像，可删可存。只要按下快门，就可在背面的液晶显示屏 LCD 上看到所拍摄的结果；如果对相片不满意，可以删掉重拍，拍到满意为止，可做到万无一失。

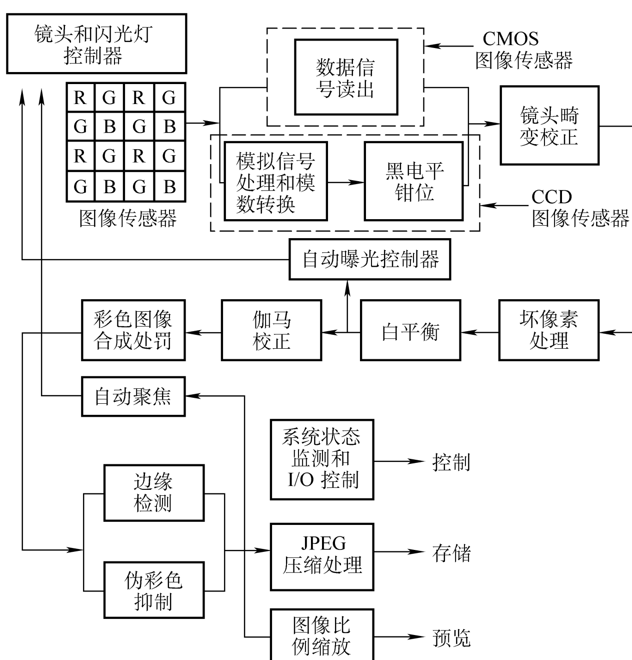



图 9-51　数码相机处理流程

3）保存持久不变色。数码图像存入磁盘或刻入光盘都可以长久保存，而且不用担心变色、变质等问题。

4）可后期创意制作。数码摄影最大的一个优点便是可以进行图片的后期制作。在原始图像信息输入计算机后，可以运用图像处理软件按照自己的想象和要求来修改图片。数码摄影留给后期制作的空间更为开阔。完全可以让制作者驰骋想象，挥洒创意。

5）连拍间隔长。在按下快门即数码相机真正记录数据之前，需要等待 1.5s，这是因为数码相机要进行调整光圈、改变快门速度、检查自动聚焦、打开闪光灯等操作。数码相机每拍摄完一张照片，要等待 3 ~ 7s 才能拍摄下一张照片，这是因为数码相机要对已拍摄的照片进行图像压缩处理并存储起来，由于存储卡的存储速度较慢，故数码相机的拍摄速度，特别是连拍速度还无法达到专业摄影的要求。

## 9.10　传真机

### 9.10.1　传真机的基本原理

传真机是一种结合光学影印技术与电话传输技术将一份文件传送到另一端的一种光机电一体化的通信设备。它先是对送入的文件通过图像传感器逐行地扫描，利用光电转换原理，将黑白字迹变成数字脉冲，并将其调制后转换为音频信号，通过标准电话线路的传送，进入接收方的传真机。接收方的传真机再利用还原解调装置将信号恢

复成数字脉冲，该数字编码信号被解码后就可以重新得到图像元素原始的形式。

传真机通信采用了先进的平面扫描和光电转换技术及数据传输技术。其基本通信过程如图 9-52 所示。

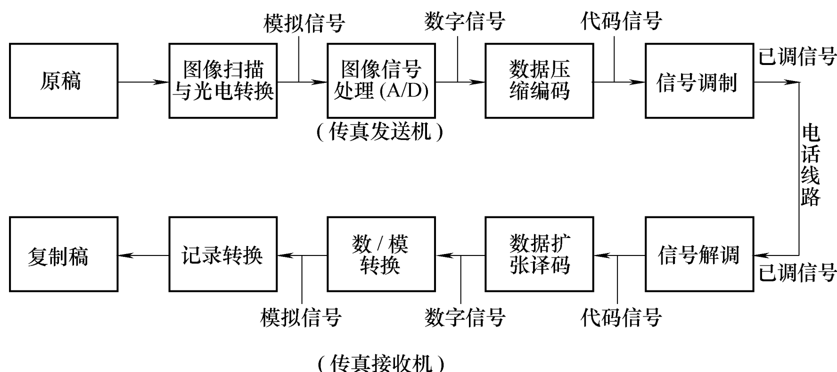



图 9-52　传真机基本通信过程

从图 9-52 所示，传真机通信任务主要由传真发送机、传真接收机与电话线路（模拟信道）等三个部分共同完成。在传真通信过程中，要求每台机器既能发送图文信息，也能接收图文信息。传真机基本通信过程如下。

**1. 传真发送机发送文稿的过程**

（1）扫描原稿图像　在发送端将待发送的原稿（文件、报表、图片等）放在原稿台上，启动自动进稿机构，经过光学系统（包括光源、透镜和反射镜等）从左到右、从上到下的逐行扫描，把图形分解成很多微小的像素，并按照扫描的顺序把这些二维的平面图形信息转变成一维的随时间变化的光信号。传真机的发送扫描采用机械扫描和电子扫描相结合的方法。例如行扫描采用电子扫描，帧扫描采用转动滚筒的方法。

（2）光电转换　作用是把图像扫描分解所得的带有图像信息的光信号，按照其灰度转换成不同强度的电信号。具体方法是：将光照射到发送的图形上，根据各像素反射光的强度转换成相应的电信号（电信号的强弱与像素的亮度成正比）。传真机中常用 CCD 或 MOS 作为光电转换器件。

（3）信号处理　光电转换出来的电信号是模拟信号，为了进行后续的数据压缩编码和传输，必须对模拟图像信号进行数字化处理，即模拟/数字（A/D）转换。

（4）数据压缩编码　经数字化的图像信号，其数据量相当大，传送时间较长，因此必须进行数据压缩。不过，由于一幅图像内部各像素之间有很强的相关性，所以图像信息的多余度很大。以此来压缩数据可大大缩短传送时间，提高传输速度。而在接收端，只要将接收到的信号进行反变换、解压以后再送入记录转换电路就可以了。G3、G4 传真机将收、发合为一体，因此它既有发送信号处理电路，也有接收信号处理电路。

（5）信号调制　为了使传真发送机的数字代码在公用电话网上或数据网上传输，

需要用调制器将数字信号调制到模拟载频上，然后将已调制的信号送上电话线路，传送到对方。三类传真机是在发送端把光电转换器件和信号处理后输出的数字信号压缩，再用正交振幅调制（QAMR）的方法把信号调制在载频上，然后发送到线路上；而四类传真机是把压缩过的数字信号进行线路编码以后再发送到线路上。

（6）传输　传真信号的传输由电信网完成，它不包含在传真机中。三类传真机的信号由模拟信道传输，四类传真机的信号由数字信道传输。

**2. 传真接收机接收文稿的通信过程**

传真接受机接收文稿的通信过程和对信号的处理大致与发送通信过程相反。首先用信号解调器对线路上传送来的已调信号进行解调，从中恢复出发送方的编码压缩信号（也称代码信号）；然后利用译码器对代码信号进行翻译，即可得到原图像数据的数字信号；再将这一信号转换成模拟信号，由记录部件记录在专用的记录纸上。当接收机收到全部数据并完成记录工作后，即可获得与发送机原稿相同的传真副本。

## 9.10.2　传真机的组成

传真机由机械部分和机电路部分组成，传真机的外形结构如图 9-53 所示。机械部分包括传真件走纸机构，而电路部分包括主控电路、传真图像输入机构、传真图像输出机构、调制解调电路、操作面板及电源。

**1. 主控电路**

主控电路对传真机的工作方式和状态进行控制。主控电路包括 16 位（或 8 位）的 CPU、程序只读存储器 ROM、数据随机存储器 RAM、地址译码器和传输控制电路组成。主控电路控制内容主要是发送传真操作和接收传真操作，发送传真操作包括传真图像扫描输入、图像数据传送、图像数据处理及调制输出。接收传真操作包括传真信号接收、解调、存储及输出。传真机工作时主控电路从 ROM 中读出程序运行，数据存储在 RAM 中。

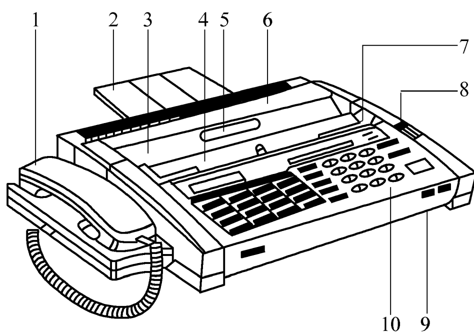



图 9-53　传真机的外形结构

1—电话机　2—导纸板　3—记录纸出口
4—稿件架　5—记录纸窥视窗　6—记录纸带
7—待发文件入口开启　8—操作面板掀起开关
9—已发文件出口　10—操作面板

传输控制电路由可编程 I/O 接口和可编程 DMA 控制器组成，主要功能是配合主控电路完成信号传输。

**2. 传真图像输入机构**

传真图像输入机构在主控电路发出的信号控制下完成传真稿的扫描输入和图像数据处理。传真输入机构由传真稿输入传动机构、光电图像传感器、模拟信号处理器、A/D 转换器及灰度校正电路、门阵列、二进制和半色调 ROM、存储器组成。

传真稿输入传动机构，由传真稿光电检测器、走纸步进电动机构成。发送传真时，传真稿从传动机构进入，光电图像传感器将传真稿上的图像信号，转换为模拟电信号，

送模拟信号处理器处理。处理后的模拟电信号，送 A/D 转换器转换为数字信号，送入门阵列，在主控电路发出的有效行处理信号和读处理信号控制下输出。由于图像传感器的非线性，由 A/D 转换器输出的信号，不能直接作为图像信息输出，输出的图像信息是根据 A/D 转换器输出的数字信号在 ROM 中读出的信息。此图像信息经压缩编码后送往调制器调制输出。

目前普及型传真机使用的光电图像传感器，大多是接触式 CIS（contact image sensor）传感器。有些传真机使用的光电图像传感器是 CCD（charged couple device）电荷耦合器。传真机的两个重要参数灰度级和图像分辨率主要取决于光电图像传感器性能。

**3. 传真图像输出机构**

传真图像输出机构完成已接收传真稿的打印输出，有些传真机设有并行接口，可将传真图像输出至计算机或打印机。传真图像输出电路常由单片微处理器、扩展输入输出接口、模数转换器和存储器组成，接收来自解调器的传真图像输出。传真图像输出机构按打印原理分，有热敏打印、喷墨打印、激光打印和 LED 打印等。目前普及型传真机大多使用热敏打印方式，只是需要用较贵的热敏纸；喷墨打印、激光打印与相应打印机工作原理完全相同，传真机的喷墨打印方式较容易实现彩色输出；LED 打印方式与激光打印类似，但是省去了由激光器、激光透镜组、多边旋转镜等复杂的光路和电路，用一排发光 LED 紧紧地贴在感光鼓上成像，降低了成本。

**4. 调制解调电路**

调制解调电路像一台 MODEM，完成传真信息的调制发送、接收解调和线路切换。调制解调电路由调制器、解调器和线路接口控制电路组成。

线路接口控制电路是电话和传真机之间连接和切换控制的专用接口，主要由线路切换电路、振铃信号检测电路和摘机传感器组成。线路接口控制电路，是电话和传真机之间连接和切换控制的专用接口，主要由线路切换电路、振铃信号检测电路和摘机传感器组成。调制器在传真图像信息上加入一调制信号，将信号转换为可用电话线传输的信息，通过接口电路输出。为节省传输数据时间，调制图像信息时传真机会按一定规则对传真图像信息进行压缩。解调器滤除接收到传真信息中的调制信号，将其还原为传真图像信息，经解压缩电路解压后，送传真图像输出机构输出。

**5. 操作面板**

操作面板像电脑的键盘和显示器，由用户观察并操作控制传真机的工作状态。操作面板主要由单片微处理器、扩展接口、按键、液晶显示屏 LCD 组成，其功能主要是按键控制、LCD 显示控制和主电源开关控制。

**6. 电源**

大多数传真机，使用类似计算机的开关式电源，为整机提供能源。开关式电源电路，由输入滤波整流电路、控制驱动电路、开关电路、5V 输出电路、±12 输出电路（或 24V 输出电路）及保护电路组成。开关式电源能输出平滑而稳定的电压。

综上所述，就结构和工作原理而言，传真机像一台带有打印机、扫描仪、调制解调器的专用电脑。虽然带有打印机、扫描仪、调制解调器并具有网络唤醒功能的电脑能实现传真机的全部功能，但就发送、接收传真而言，还是不如传真机方便。

### 9.10.3　传真机的分类

传真机的种类比较多，分类的标准也不尽相同。但是万变不离其宗，传真机都具有收发、传真和复印三个基本功能。

1）按照色调来分类，可以分成真迹传真机、相片传真机和彩色传真机。

2）按照通信时所占电话线路来分类，可以分成单路传真机和多路传真机。

3）按照制作原稿的性质来分类，可以分成文件传真机和图片传真机。

4）按照传真机打印方式的不同，可分为喷墨式传真机、热转印传真机、激光传真机。喷墨式传真机打印方式同一般喷墨打印机一样，也是利用墨水打印，可使用一般纸张记录与接收资料；热转印传真机使用类似复写方式的加热转印原理，是利用色带打印，可以使用普通纸进行打印；激光传真机打印方式同一般激光打印机利用墨粉打印。

5）按照传真机记录方式的不同，可分为热敏纸传真机和普通纸传真机。热敏纸传真机是使用热感头，在特殊纸张以加热打印的方式接收文件及资料。普通纸记录方式又可分为：热传导方式、激光静电复印方式、喷墨记录方式、LED 记录方式。

综合所述，可以把传真机大致可以分为 4 个类别：

1）热敏纸传真机（也称为卷筒纸传真机）。热敏纸传真机是通过热敏打印头将打印介质上的热敏材料熔化变色，生成所需的文字和图形。

2）热转印式普通纸传真机。热转印通过加热转印色带，使涂敷于色带上的墨转印到纸上形成图像。

3）激光式普通纸传真机（也称为激光一体机）。利用碳粉附着在纸上而成像，其工作原理主要是利用机体内控制激光束的一个硒鼓，凭借控制激光束的开启和关闭，从而在硒鼓产生带电荷的图像区，此时传真机内部的碳粉会受到电荷的吸引而附着在纸上，形成文字或图像图形。

4）喷墨式普通纸传真机（也称为喷墨一体机）。工作原理与点矩阵式打印相似，是由步进马达带动喷墨头左右移动，把从喷墨头中喷出的墨水依序喷布在普通纸上完成打印的工作。

### 9.10.4　传真机的主要技术指标

传真机的种类很多，不同种类的传真机具有不同的技术参数。这些参数可确定传真机的性能及它们之间的互通性。因此，在选择和使用传真机时，必须慎重考虑这些参数。

1）扫描方式。

2）扫描点尺寸。

3）扫描线长度。

4）扫描行距。

5）扫描线密度。

6）扫描线频率和扫描线速率。

7）图像传送时间。

8）合作系数。

9）频带宽度。

## 9.11 刻录机

刻录机，即 CD-R，是英文 CD Recordable 的简称，如图 9-54 所示。其所用 CD-R 盘的容量一般为 650MB。它上面所记载资料的方式与一般 CD 光盘片是一样的，也是利用激光束的反射来读取资料，所以 CD-R 盘片可以放在 CD-ROM 上读取，不同的是 CD-R 盘可以写一次。

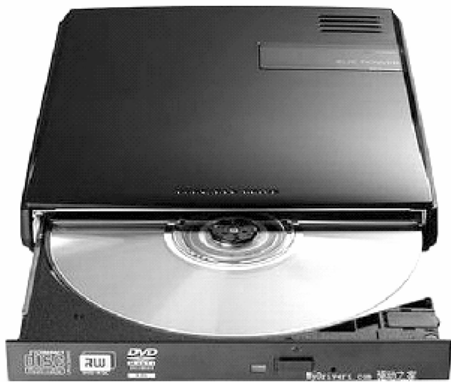



图 9-54　刻录机

### 9.11.1 刻录机的原理

刻录机中的半导体激光器产生的激光束照射在刻录光盘的有机染料层上，将有机染料层融化形成永久性的凹凸不平的形态（CD-R）或使有机染料产生结晶与非结晶的可恢复的相位变化（CD-RW），从而记录二进制数字信息。

### 9.11.2 刻录机的分类

刻录机可以分两种，一种是 CD 刻录，另一种是 DVD 刻录。使用刻录机可以刻录音像光盘、数据光盘、启动盘等。CD 容量为 700MB，DVD 容量为 4.5G。

**1. CD 刻录机**

目前大部分刻录机除支持整盘刻写（Disk at Once）方式外，还支持轨道刻（Track at Once）写方式。使用整盘刻录方式时，用户必须要将所有数据一次性写入 CD-R 盘，如果准备的数据较少，刻录一张盘势必会造成很大的浪费。而用轨道刻写方式就可以避免这种浪费，这种方式允许一张 CD-R 盘在有多余空间的情况下进行多次刻录。

现在市场上还有一种 CD-RW 的刻录机和盘片，这种 CD-RW 是可以擦写的，而且擦写次数可高达一千次以上。

随着各种数据文件尤其是视频文件体积的“膨胀”，人们对容量的要求也越来越高，仅能刻录 650MB 数据的 CD-RW 刻录机已经显得捉襟见肘。正因为如此，越来越多的人们开始把目光转向了 DVD 刻录机。

**2. DVD 刻录机**

DVD 的全称是 Digital Video Disk，即数字视频光盘。它可以分为单面单层、单面双层、双面单层和双面双层四种物理结构，被命名为 DVD-5、DVD-9、DVD-10 和 DVD-18。这四种不同规格的 DVD 容量分别为 4.7GB、8.5GB、9.4GB 和 17GB。即使按照容

量最小的 DVD-5 规格来算，4.7GB 的数据存储容量也是普通 CD-R 的 7 倍多。除了拥有更大容量之外，大多数的 DVD 刻录机都支持市面上所有常见盘片的刻录，也就是说它们不但能刻录 DVD ± R/RW，而且能刻录 CD-R/RW。以 4X 的 DVD-RW 刻录机为例，刻满一张 4.7GB 的 DVD-R 光盘耗时还不到 15min。

常见的 DVD 规格有 DVD-RAM、DVD + R/RW 和 DVD-R/RW 等。其中 DVD-RAM 是最早出现的 DVD 规格，由松下的 PD 演进而来。DVD-RAM 盘片在数据存储格式上与硬盘相类似，比较适合长时间保管资料。但是由于在流行的 DVD 光驱和播放机中无法播放，现在民用市场已经很少见到 DVD-RAM 了。

### 9.11.3　刻录机的主要性能指标

**1. 数据传输速度**

数据传输速度又称为读写速度，表示读取数据和刻写数据的快慢程度，单位是"倍速"，通常用 X 表示。1X 即 1 倍速，指每秒传输 150KB 的数据；2X 即 2 倍速就是 300KB。

CD-R/CD-RW 刻录机也有倍速之分，CD-R 刻录机有刻录速度和读取速度两个速度指标，而 CD-RW 刻录机有三个速度指标：刻录速度、擦写速度和读取速度，前两项指标是 CD-RW 刻录机的主要性能指标，读盘功能通常作为 CD-ROM 4 备用。

如某 CD-RW 刻录机标示为 8Xwrite、4Xrewrite、32Xread（简称 8432），表示该刻录机的刻录速度是 8X、擦写速度是 4X、读取速度是 32X。目前，这种 8432 型号的 CD-RW 刻录机已成为普及产品。

衡量刻录机读写速度的另一个重要指标是平均读取时间，或称为平均查找时间（Average Seek Time），它是指从光头定位到开始读盘的时间，一般来说此值越小刻录机的读写速度越快。现在高速刻录机平均查找时间一般在 150ms 左右。

刻录过程中有一个对光盘记录层的激光烧结操作，烧结速度过快会造成光盘记录层烧结不完全，影响读取光盘时的激光反射，造成数据难以读出甚至盘片作废的后果，所以，需要选择支持速度比较快的光盘来进行高速刻录。

**2. 刻录机接口**

根据安装在电脑上还是放置在电脑之外的不同安装方式，刻录机又可分为内置式和外置式。

按照接口分类，刻录机还可分为内置式 SCSI 接口、IDE 接口，外置式 SCSI 接口、EPP 接口（加强型并行端口，即打印机并口）及 USB（通用性串行总线）接口。无论是内置式还是外置式 SCSI 接口刻录机，其数据传输速度都比较快。但是要通过 SCSI 接口卡与计算机相连，而且 SCSI 接口刻录机和内置式 IDE 接口的刻录机一样，需要打开计算机机箱进行安装，连接较麻烦。外置式 EPP 接口的刻录机安装简便，价格较便宜，但速度稍慢一些。USB 接口是随着计算机技术的发展在近几年应运而生的一种外设接口技术。USB 接口设备具有热插拔功能，与计算机的连接非常方便。

**3. 缓存容量**

为了有利于刻录机稳定工作和数据连读传输，在刻录过程中数据先存入缓冲区，

再被调出来刻录，在刻录的同时又将后续要刻录的数据写入缓存中，以便保证要写入数据良好的组织和连续传输。如果后续数据没有及时写入缓冲区，传输的中断将导致刻录失败。因此缓冲的容量越大，刻录的成功率就越高。这个数据缓冲区即缓存，缓存容量是指存放数据的能力，越大越好，一般为 2M ~ 8M。

**4. 兼容性**

刻录机的兼容性也非常重要，兼容性分为硬件兼容性和软件兼容性，硬件兼容性是指支持的空白光盘片的种类，好的刻录机对各类的盘片都应该有良好的兼容性。软件兼容性是指烧录软件。目前有很多种刻录软件，如 DirectCD、PacketCD、Nero、FloppyCD 等，刻录机所支持的刻录软件越多，也就越方便用户的使用。

另外，刻录方式的兼容性也很重要。例如是否支持 AudioCD、PhotoCD、CD-I、CD-EXTRA 等多种光盘片格式，是否支持 DAO（Disk-At-Once）、TAO（Track-At-Once）、MS（Multi-Session）、Packet Writing 等多种刻录方式，尤其是否支持增量包刻录（Incremental Packet Writing）方式，该技术允许用户在同一条轨道中多次追加刻写数据，提高了光盘片的使用效率和刻写的稳定性，是最常用的刻录方式之一。

## 9.12 静电复印机

静电复印机是集静电成像技术、光学技术、电子技术和机械技术于一体的办公设备，如图 9-55 所示。自 20 世纪 50 年代美国施乐公司推出第一台商用模拟复印机以来，复印机作为一种文印工具，已成为现代办公不可缺少的设备，它能够快速、准确、清晰地再现文件资料及图样的原型，从而给人们的办公、科研、生产和生活带来了极大的方便。复印机已经成为办公机构提高工作效率的一种重要的办公设备之一，其使用范围日益广泛。



图 9-55　静电复印机

### 9.12.1 静电复印机的结构

静电复印机按照各部分功能，主要可以划分为曝光系统、成像系统、输纸系统和控制系统机。图 9-56 为静电复印机各部分系统的组成方框图。

曝光系统包括原稿台玻璃、原稿照明部分、反射镜组、镜头等部分组成。这些部件一般位于机器的上部。

成像系统包括位于机器中心的感光鼓、位于感光鼓上部的鼓清洁部件、位于感光鼓周围的充电转印和消电三个电极、位于感光鼓一侧或下边的显影部分等。

输纸系统包括供纸盒、接纸盒、供纸控制部分（定位辊）、转印分离、输纸、定影部件等。

控制系统部分主要包括操作部分和电器部分。具体的有电源部件、高压发生装置、偏压控制电路、显影控制电路、操作驱动电路、灯光控制电路、继电器控制电路、时序脉冲控制电路、各部分的传感器及电路开关等。电路的印刷线路板多位于机器后部及两侧，主控板则位于机器前侧。

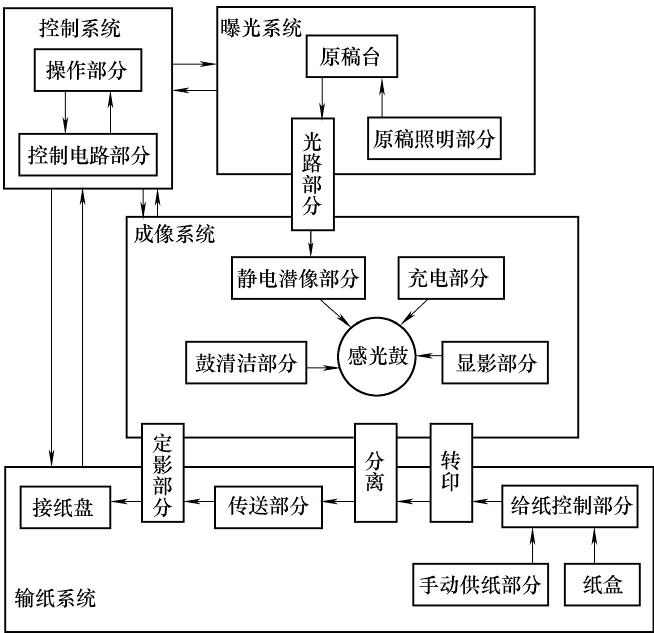



图 9-56　静电复印机各部分系统的组成方框图

图 9-57 为静电复印机各部分系统的组成。

## 9.12.2　静电复印机的工作原理

静电复印机采用的成像方法有很多，如间接式静电复印法（即卡尔逊法），NP 静电复印法、KIP 持久内极化法、TESI 静电转移成像法等。现代静电复印机普遍采用间接式静电复印法和 NP 静电复印法。

卡尔逊静电复印的过程本质上是一种光电过程，如图 9-58 所示。

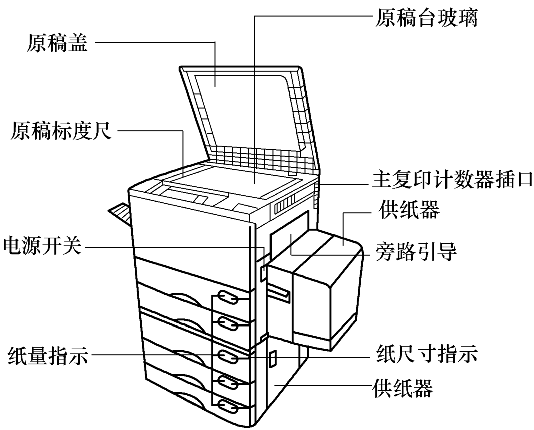



图 9-57　复印机的结构

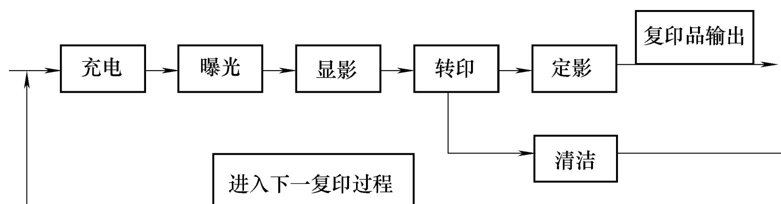



图 9-58　“卡尔逊法”静电复印的全过程

它所产生的潜像是一个由静电荷组成的静电像，其充电、显影和转印过程都是基于静电吸引原理来实现的。卡尔逊静电复印法大致可分为充电、曝光、显影、转印、分离、定影、清洁、消电 8 个基本步骤。图 9-59 为静电复印机复印过程分步示意图。

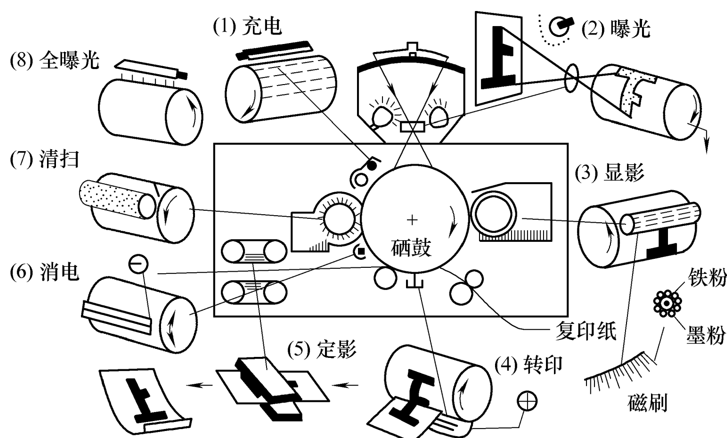



图 9-59　静电复印机复印过程分步示意图

（1）充电　就是使感光鼓在暗处，并处在某一极性的电场中，使其表面均匀地带上一定极性和数量的静电荷，即具有一定表面电位的过程。这一过程实际上是感光鼓的敏化过程，使原来不具备感光性的感光鼓具有较好的感光性。充电过程只是为感光鼓接受图像信息准备的，是不依赖原稿图像信息的预过程，但这是在感光鼓表面形成静电潜像的前提和基础。目前静电复印机中通常采用电晕装置对感光鼓进行充电。

（2）曝光　将等待复印的文稿正面向下扣在原稿台上，感光鼓转动，光源对文稿照射，原稿图像经光照射后，图像光信号经光学成像系统投射到感光鼓表面。充电后的感光鼓具有以下的特性：在光强的地方电荷消失的多，光强的地方电荷消失的少。因此在感光鼓表面静电电位的高低随原稿图像浓淡的不同而不同，感光鼓上对应图像浓的部分表面电位高，图像淡的部分表面电位低。这样，就在感光鼓表面形成了一个与原稿图像浓淡相对应的表面电位起伏的静电潜像。

（3）显影　感光鼓内部有显影剂箱，箱内有一个带有磁性的显影辊。显影箱中装有掺了铁粉的墨粉，铁粉吸引墨粉，一串串地挂在显影辊上。感光鼓继续转动，鼓面上的静电潜像转到显影剂箱，墨粉遇到静电潜像，由于静电潜像的电场吸引力比铁粉对墨粉地吸附力大，墨粉在电场的作用下被吸附在静电潜像上。静电潜像电位越高的

部分，吸附色粉的能力越强；静电潜像电位越低的部分，吸附色粉的能力越弱。这样，感光鼓表面不可见的静电潜像，就变成了可见的与原稿浓淡一致的不同灰度层次的色粉图像。而此时，由于铁粉的电性与静电潜像的电性相同，电荷相斥，铁粉又落回显影剂箱中。

（4）转印　转印就是当复印纸与转动的感光鼓表面的色粉图像接触时，在复印纸的表面加上比感光鼓更强的正电荷，从而将感光鼓上带有负电荷的墨粉吸附到复印纸上的过程。目前静电复印机中通常采用电晕装置对感光鼓上的色粉图像进行转印。在静电复印机中为了易于转印和提高图像色粉的转印率，通常还采用预转印电极或预转印灯装置对感光鼓进行预转印处理。

（5）分离　在前述的转印过程中，复印纸由于静电的吸附作用，将紧紧地贴在感光鼓上，分离就是将紧贴在感光鼓表面的复印纸从感光鼓上剥落（分离）下来，使纸继续沿着纸路前进到定影位置的过程，静电复印机中一般采用分离电晕（交流、直流）等方法来进行纸张与感光鼓的分离。

（6）定影　定影就是把复印纸上的不稳定、可抹掉的墨粉图像固化的过程。通过转印、分离过程转移到复印纸上的墨粉图像，并未与复印纸融合为一体，这时的墨粉图像容易被擦掉，因此需经定影装置对其进行固化，以形成最终的复印品。目前的静电复印机多采用加热与加压相结合的方式，将墨粉中的树脂熔化进行定影经过加热加压成为永久的图像，从而完成整个静电复印的工作过程。定影装置加热的温度和时间，以及加压的压力大小，对墨粉的粘附牢固度有一定的影响。其中，加热温度的控制，是图像定影质量好坏的关键。

（7）清洁　由于转印效率一般只有 75%，因此需要对感光鼓表面进行清洁。清洁就是清除经转印后还残留在感光鼓表面色粉的过程。感光鼓表面的墨粉图像由于受表面的电位、转印电压的高低、复印介质的干湿度及与感光鼓的接触时间、转印方式等的影响，在大部分墨粉经转印从感光鼓表面转移到复印介质上后，感光鼓表面仍残留有一部分，如果不及时清除，将影响到后续复印品的质量。因此必须对感光鼓进行清洁，使之在进入下一复印循环前恢复到原来状态。静电复印机机中一般采用刮板、毛刷或清洁辊等装置对感光鼓表面的残留色粉进行清除。

（8）消电　消电就是消除感光鼓表面残余电荷的过程。由于充电时在感光鼓表面沉积的静电荷，并不因所吸附的色粉微粒转移而消失，在转印后仍留在感光鼓表面，如果不及时清除，会影响后续复印过程。因此，在进行第二次复印前必须对感光鼓进行消电，使感光鼓表面电位恢复到原来状态。静电复印机中一般采用曝光装置来对感光鼓进行全面曝光，或者用消电电晕装置对感光鼓进行反极性充电，以消除感光鼓上的残余电荷。

NP 静电复印法是日本佳能公司发明的一种新的静电复印方法，这种方法有别于传统的卡尔逊静电复印法，它是卡尔逊静电复印法的改进和发展。NP 静电复印法基本过程它主要由前消电/前曝光、一次充电（主充电）、二次充电/图像曝光、全面曝光、显影、转印、分离、定影、鼓清洁 9 个基本步骤组成。从上述步骤我们可以看到，NP 法的静电复印过程比典型的卡尔逊法静电复印过程复杂，其主要原因是 NP 法采用的光电

导材料虽然光敏性很好，但暗阻率太低，充电以后暗衰太快，不能像硒等其他光电导材料那样能长时间地保存电荷。因此使用硫化镉光电导材料的感光鼓结构也与典型卡尔逊法的感光鼓结构不同。卡尔逊静电复印法的感光鼓一般是两层结构，即光电导层和导电基本。而NP法的感光鼓则是由透明的绝缘层、光导层和导电基本三层构成。

## 9.13　光盘驱动器

光盘驱动器是一个典型的光机电一体化产品。在光学和电子结合方面，激光光源来自于一个激光二极管，它可以产生波长约0.54～0.68μm的光束，经过处理后光束更集中且能精确控制，光束首先打在光盘上，再由光盘反射回来，经过光检测器捕获信号。光盘上有两种状态，即凹点和空白，它们的反射信号相反，很容易经过光检测器识别。检测器所得到的信息只是光盘上凹凸点的排列方式，驱动器中有专门的部件把它转换并进行校验，然后我们才能得到实际数据。光盘在光驱中高速转动，激光头在伺服电动机的控制下前后移动读取数据。



图9-60　CD-ROM驱动器

光盘驱动器按照所用光盘不同分为CD-ROM驱动器、CDRW-ROM驱动器、DVD-ROM驱动器，如图9-60所示。通常指的是CD-ROM驱动器。CD-ROM作为计算机系统的外存，主要用于读取存储于光盘上的文字、图片、声音、动画和电视图像等数据。CD-ROM若配上相应的硬件和软件（MPEG解压卡或解压软件）也可播放CD和VCD光盘。

### 9.13.1　光盘驱动器的组成与结构

光盘驱动器的内部结构从理论上来讲，无论是以前的CD光盘驱动器、DVD光盘驱动器还是如今主流的DVD刻录机，大致都是相同的。光盘驱动器系统是由激光源、光学系统、电气控制系统和机械部件等组合而成。图9-61为CD-ROM光盘驱动器数据读出系统原理图，图中给出了组成系统的主要部分。

1）光盘读出部分（光学头）。即图9-61中虚线框内部分，由激光器与相连的其他光学系统组成，如图9-62所示。光学头的主要功能就是把激光器发出的光束以$\phi 1\mu m$直径的极小光点聚焦在光盘上，并根据光盘上反射回来的光读出存储的信息。光学头中的聚焦物镜是关键元件，其功能是把从激光器发出，并经准直以后的激光束聚焦在光盘的记录层上，把从盘面反射回来的光束变成平行光，送到检测器进行读出。入射

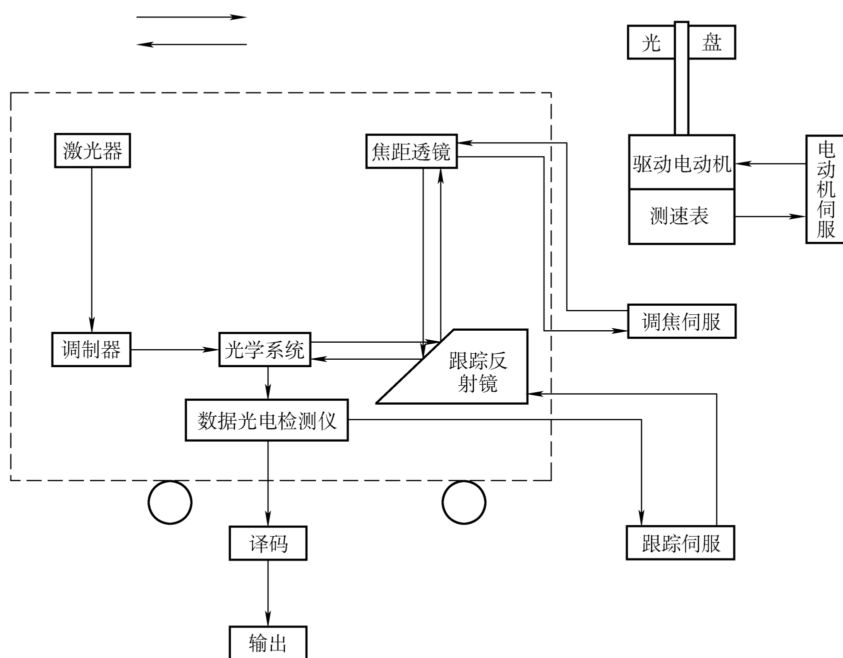



图 9-61　光盘数据读出系统原理图

到光盘的光束与是光盘轴垂直的，因此，物镜的聚焦调节是沿着这个轴向运动。一般的光学头多数采用动圈式致动器在盘面垂直的方向上驱动物镜运动。物镜安装在类似扬声器的音圈上，音圈外包有永久磁铁，从光探测器得到的聚焦误差信号经放大滤波后输入到由驱动电路、音频线圈和磁铁组成的致动装置，线圈电流的变化使磁场变化，由此而产生的磁场力迫使线圈运动，直至准确聚焦。光学头的功能是通过光学系统实现的，在图 9-62 中可以看到，半导体激光器 1 发出的光束经透镜 2、3 整形准直后，变成圆平行光，到达偏振光分束器 4 变成只有一个振动方向的线偏振光，此线偏振光通过 1/4 波片光栅 5 后变成圆偏振光，经反射镜 6、聚焦透镜 7，聚焦成圆形光斑后落在光盘 8 的信号层上。从信号层反射回来的光束仍是圆偏振光，在再次通过 1/4 波片光栅 5 后，又变回线偏振光，但偏振方向旋转了 90°，因此出射光与反射光虽然共用光路也不会互相干涉。反射光束到达偏振光分束器 4 却不能进入激光器而只能到达分束镜 9，一部分经透镜 10 会聚于读出光电探测器 11，得到读出信号，另一部分经透镜 12 会聚于聚焦、跟踪误差检测器 13，得到聚焦、跟踪误差信号。

2）检测和校正光点与数据道之间的定位误差的光电系统。通过光检测器产生聚焦伺服与跟踪伺服信号，根据这些信号在与光盘垂直的方向上移动聚焦透镜，在光盘的半径方向上移动聚焦透镜或使跟踪反射镜偏转，即可相应地实现聚焦控制和跟踪控制，把激光聚焦于光盘的记录层上，使光点中心与信道中心吻合。

3）光盘。

4）光盘转动与控制机构。由直流电动机带动光盘旋转，由测速表测定转速并通过

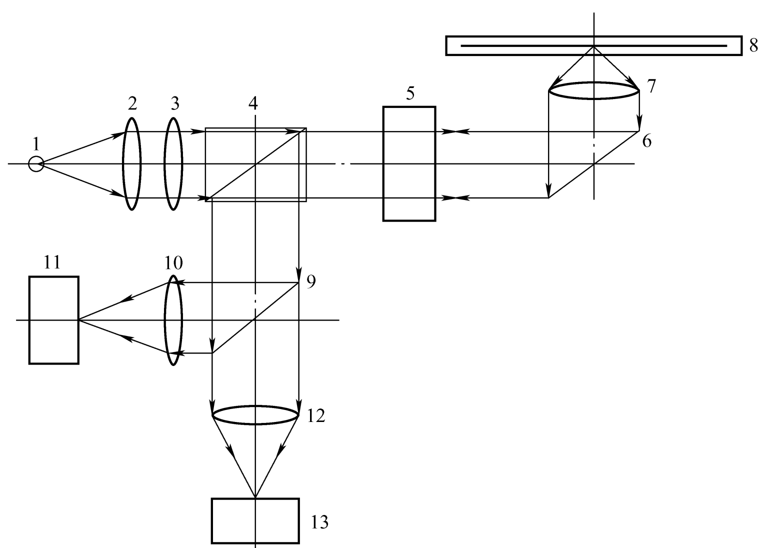



图 9-62 光盘数据读出系统的光路图

1—光源（半导体激光器） 2、3、12—透镜 4—偏振光分束器 5—1/4 波长片
6—反射镜 7—聚焦物镜 8—光盘 9—分束镜 10—透镜 11—读出探测器
13—聚焦、跟踪误差探测器

旋转编码器产生伺服信号控制光盘的转速。

5）电子线路。包括控制所有运动机构的伺服电路、信号处理电路、误差检验与校正电路。

## 9.13.2 光盘数据读出原理

CD-ROM 光盘上记录信息的光道是一条由里向外连续的螺旋形路径，在这条路径上，每个记录单元占据的长度是相等的，数据读出速度为常数，2048 个字节称为一块，通常限制块在 27 万个以下。读取 CD-ROM 数据的主要参数如下：

激光束相对于光道的扫描速度：1.2 ~ 1.4m/s

光道间距：1.6μm

扫描方向：逆时针方向

CD-ROM 光盘是单面只读光盘，利用凹坑来存储信息。激光经过一系列光学透镜后，聚焦为 1μm 的焦点，此焦点刚好落在光盘的镀铝反射膜上。激光束不是从小凹坑的一面读取信息，而是从小凹坑的背面读取信息（见图 9-63）。这样原来存储信息的一个小凹坑，从背面看就成了一个小凸起。激光束投射到光盘上没有凸起的地方，反射面为一平面，垂直照射光盘的激光束产生全反射，反射光又按原光路返回物镜，经 1/4 波片和光束分离器，把反射光和从激光器发来的入射光分离开，如前所述，1/4 波片可避免反射光返回激光发射器。当激光束照射在有小凸起的地方时，由于光的衍射作用，使部分反射光不能按原光路返回，而且光程相差 1/2 波长，导致互相干涉，因此反射

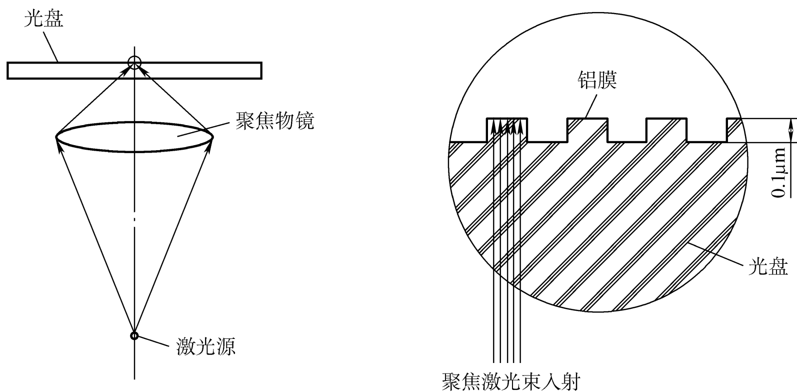



图 9-63　激光源和光盘数据读出示意图

回物镜的光减弱了，只相当于没有凹坑时的 1/10（见图 9-64），从光束分离器分出的反射光也相应减弱。用光电探测器检测这些反射光，并将光束入射至光盘无凹坑处上设为 0，而入射至有凹坑处设为 1 位，经过读出信号处理电路的处理，即可将读出的信号送至光盘存储系统的输出部件去再现所记录信息。

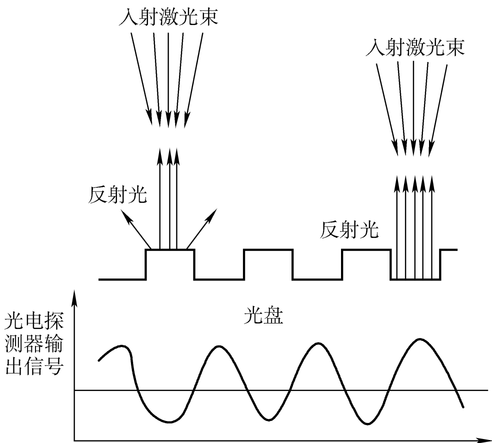



图 9-64　激光读出信息原理图

光盘读出系统的数据通路如图 9-65 所示。读出电路检测并解调从光盘上来的反射光，将信号送至控制部件的读出格式器。后者校正数据中的任何错误，除去记录时所加的用于识别信道的地址信息，并重新组织位序列，使之与输入到记录格式器的序列一致。最终的读出数据即被送到输出缓冲器。缓冲器按要求的数据速率将数据传送给用户。

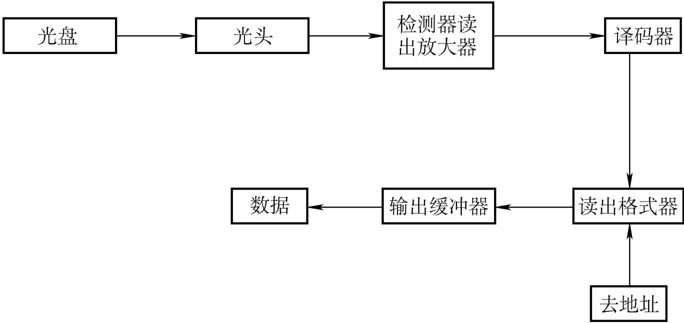



图 9-65　光盘的读出数据流

## 9.13.3　光盘伺服系统

由于各种原因，在任何一种光盘存储系统中，读/写光斑的实际位置总是或多或少地在与盘片信号面垂直的方向（$z$）、盘片圆周的半径方向（$y$）及切线方向（$x$）等三个方面上偏离所要求的正确落点位置（即目标信迹），而出现聚焦误差、径向跟踪误差及切向跟踪误差。各种光盘系统在三个方向上的允许偏差是根据光学读/写原理及所存储的信息的类型而定。通常，在聚焦方向的允差约为 ±（0.5～1）μm，径向跟踪允差约为 ±0.15μm，切向跟踪允差约为 ±0.15μm。如此小的允许偏差显然不能单靠提高机械精度的办法来实现，必须在光盘系统中设置能在以上三个方向上确保光点正确跟踪目标信迹的伺服系统。光盘伺服系统通常包括：聚焦伺服、跟踪伺服、光盘主轴电动机伺服。

1）聚焦伺服。聚焦伺服的功能是使光头聚焦透镜上下移动以跟踪盘片因高速旋转而发生的上下振动使上下振动的盘片信号面能始终落在读取光束的焦深范围内。聚焦伺服系统的组成如图 9-66 所示。聚焦伺服通过移动物镜，使读取光点始终会聚在旋转着的光盘记录介质上。

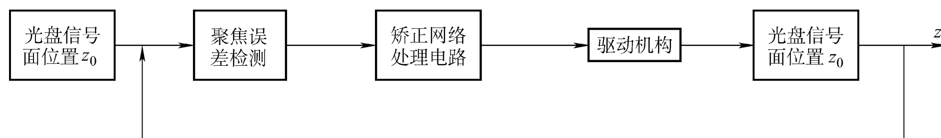



图 9-66　聚焦伺服系统框图

2）轨迹跟踪伺服就是在光盘偏心时使读取光斑始终跟踪记录轨迹。产生偏心的原因很多，如安装光盘时产生的对中误差，光盘内轴孔中用于补偿膨胀与收缩的间隙及由机械和空气动力学效应引起的颤动等，都会使信道和旋转轴不同心，引起信道在半径方向上的位移。轨迹跟踪伺服系统组成如图 9-67 所示。

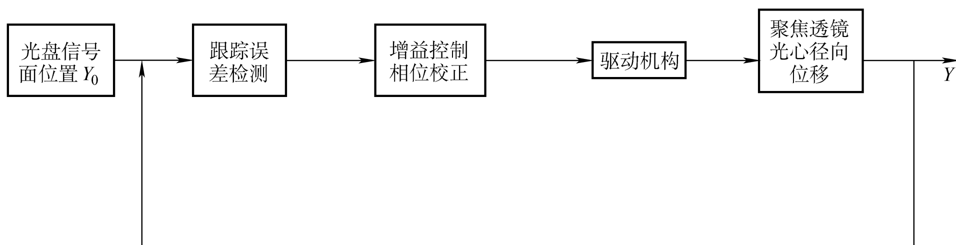



图 9-67　轨迹跟踪伺服系统框图

3）光盘主轴电动机伺服保持光盘恒定的转速，从而使记录信息的位长度保持恒定，以固定的数据通率进行信息的读取，如图 9-68 所示。

光盘驱动系统是由光学、电气和精密机械部件构成的一体化系统，其伺服控制系统必须在计算机的统一控制下协同动作，才能实现系统功能。由计算机统一协调的光

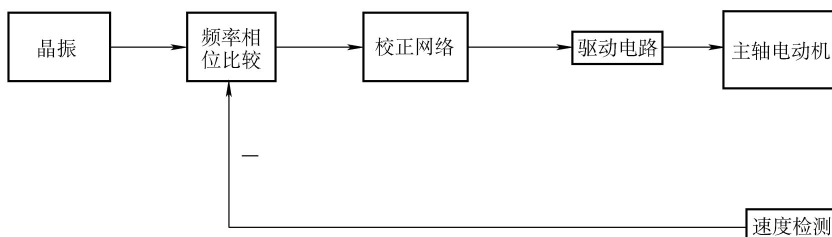



图 9-68　光盘主轴电动机伺服系统框图

盘驱动伺服控制系统结构如图 9-69 所示，它包括计算机控制、光盘主轴速度控制、聚焦、寻道和径向信道跟踪。控制系统能同时实现快速寻道、聚焦和跟踪。

4）伺服系统的工作过程。由计算机控制器发出命令，如果命令是在新的信道上读出数据，当前的信道地址是已知量，所要求的信道地址是输入量。计算机利用数学算法向伺服控制线路发出恰当的命令，后者即把寻道命令发送至光学平台和电流计。为了校正聚焦误差，还应向聚焦致动器发出命令。激光束通过光路到达光盘，遇到一个预先格式化的伺服区段，然后反射回到聚焦和跟踪误差检测器。从这些检测器来的信号被送到伺服信号处理器，经过处理后，信号就成为误差信号，并反馈回伺服控制线路。利用从检测器来的不断更新的伺服信息，就可实现任何必要的重新定位。计算机一直在接收当前状态信息，包括主轴转速误差、聚焦误差和跟踪误差等。如果某一误差超过给定的极限值，计算机就向控制极发出信息，并在必要时停机。

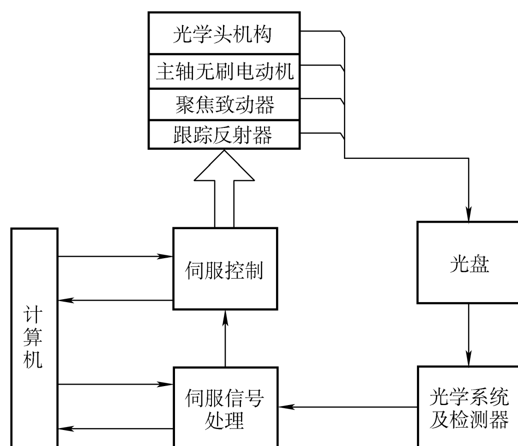



图 9-69　光盘驱动伺服系统框图

## 9.13.4　光学头运动机构

为保证光盘机正常上作，要求光点能很好地聚焦于记录介质表面，故要求物镜能上下左右灵活移动，将误差控制在要求范围内。CD-ROM 的光学头运动机构是二维机械传动机构，由聚焦和轨迹跟踪伺服系统控制，它可使光头物镜沿着互相垂直的聚焦（垂直方向）和循迹（径向方向）两个方向移动，以跟踪盘片的振摆。这种机构一般采用如图 9-70 所示形式，光学头径向移动小车通过小车驱动丝杠的驱动和导向光杠的导向作用，可沿光盘径向来回移动来循迹，这套机构又安装在垂直摆动平台上，可绕图左侧所示的摆动定轴做上下摆动以调整聚焦状况，这种传动机构能适应不同制式工作的 CD 机，耐振性好，价格便宜。

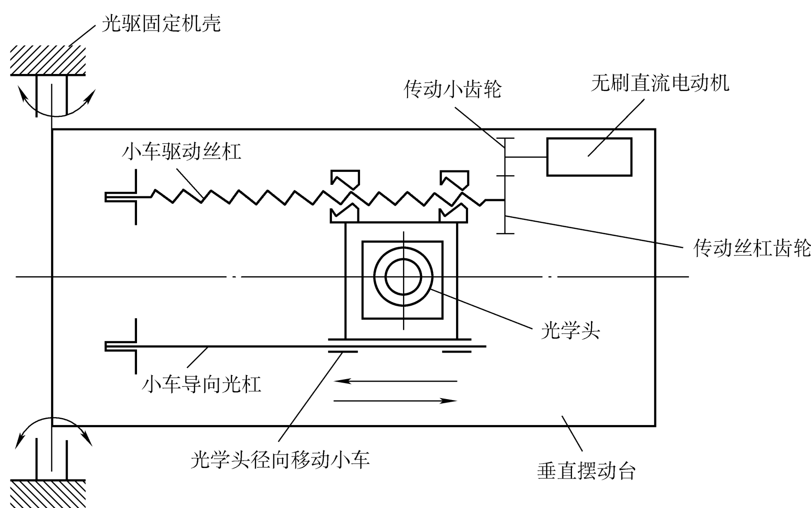



图 9-70　光学头运动机构

# 9.14　扫描仪

扫描仪是除键盘和鼠标之外被广泛应用于计算机的一种光机电一体化的输入设备。你可以利用扫描仪输入照片建立自己的电子影集；输入各种图片建立自己的网站；扫描手写信函再用 E-mail 发送出去以代替传真机；还可以利用扫描仪配合 OCR 软件输入报纸或书籍的内容，免除键盘输入汉字的辛苦。所有这些为我们展示了扫描仪不凡功能，它使我们在办公、学习和娱乐等各个方面提高效率并增进乐趣。扫描仪自问世以来以其独特的数字化“图像”采集能力，低廉的价格及优良的性能，得到了迅速的发展和广泛的普及。

## 9.14.1　扫描仪的组成

扫描仪的外型十分简洁、紧凑，但其内部结构却相当复杂。不仅有复杂的电子线路控制，而且还包含精密的光学成像器件，以及设计精巧的机械传动装置。它们的巧妙结合构成了扫描仪独特的工作方式。图 9-71 为典型的平板式扫描仪的内部与外部结构。扫描仪通常是由扫描头、主板、机械机构和光学系统等四个部分组成。

扫描头由线状 CCD 组成，它的作用是实现光电转换，其精度直接影响扫描图像的还原程度；扫描仪主板包括 CPU、A/D 转换器、接口等部分，主要完成图像数据转换，与微机接口等功能，它控制扫描仪的整个工作过程；机械机构主要由步进电动机和导轨组成；光学系统包括光源、光路、镜头等。

(1) 机盖　主要是将要扫描的原稿压紧，以防止扫描灯光线泄漏。目前随着三维实物扫描功能的逐渐普及，为了能够更加方便、更高质量地扫描三维实物，扫描仪非常讲究机盖的设计。

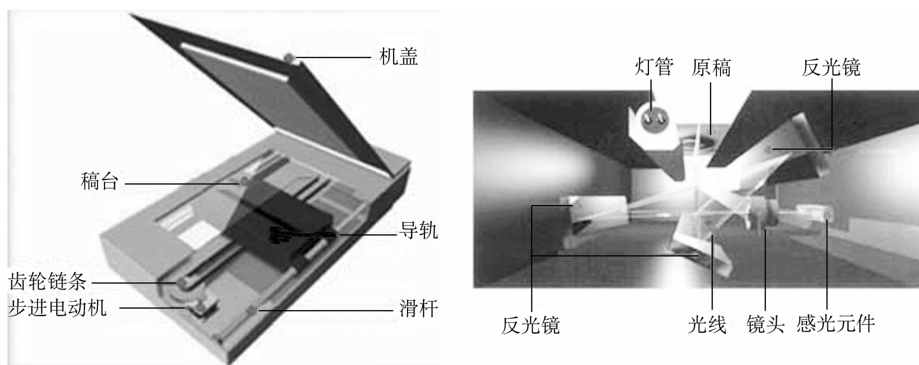



图 9-71　平板式扫描仪组成结构图

（2）稿台　主要是用来放置扫描原稿，其四周设有标尺线以方便原稿放置，并能及时确定原稿扫描尺寸。中间为透明玻璃，称为稿台玻璃。稿台玻璃清洁情况会直接影响扫描图像的质量。

（3）光学成像部分　俗称扫描头（见图 9-72），即图像信息读取部分，它是扫描仪的核心部件，用来获取原稿反射的光信息。其精度直接影响扫描图像的还原逼真程度。它包括灯管、反光镜、镜头及电荷耦合器件（CCD）等零部件。扫描头中反光镜的作用是将原稿的信息反射到镜头上，由镜头将扫描信息传送到 CCD 感光器件，最后由 CCD 将照射到的光信号转换为电信号。而镜头是把扫描信息传送到 CCD 处理的最后一关，它的好坏决定着扫描仪的精度。

（4）光电转换部分　光电转换部分是指扫描仪内部的主板，如图 9-73 所示。扫描仪的光电转换部分是扫描仪的心脏。它是一块安置有各种电子元件的印刷电路板。它是扫描仪的控制系统，在扫描仪扫描过程中，它主要完成 CCD 信号的输入处理，以及对步进电动机的控制，将读取的图像以任意的解析度进行处理或变换所需的解析度。

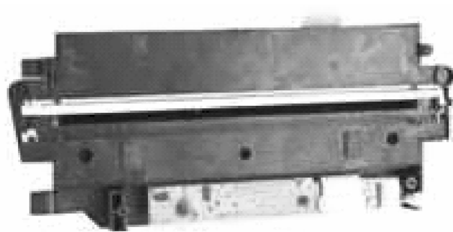


图 9-72　扫描仪光学成像部分

（5）机械传动装置　机械传动部分包括步进电动机、驱动皮带、滑动导轨和齿轮组如图 9-74 所示。

步进电动机是用脉冲信号精确控制移动的一种电动机，它是扫描仪机械传动部分的核心，也是驱动扫描装置的动力源。扫描仪的噪声和速度在一定程度上就是由它决定的。这里速度和精度与前面提到的节能和色温问题一样，存在着矛盾。速度越快移动单位距离所需的时间就短，精度就会降低；精度提高，其结果是消耗时间增加，就会造成速度减慢。

扫描过程中，步进电动机通过直接驱动皮带实现驱动扫描头，对图像进行扫描。扫描装置经驱动皮带的驱动，通过在滑动导轨上的滑动实现线性扫描的过程。而齿轮

组是保证机械设备正常工作的中间衔接设备。

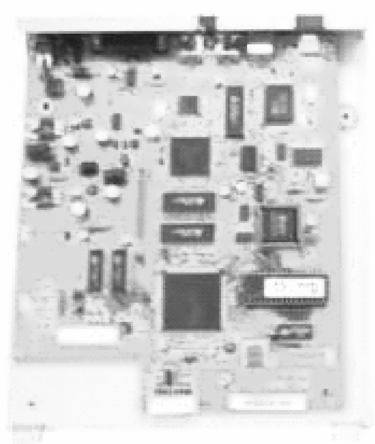


图 9-73　扫描仪光电转换部分

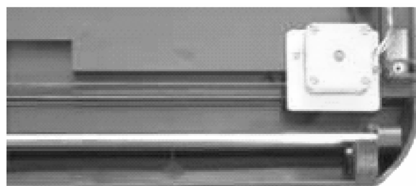


图 9-74　扫描仪机械传动部分

## 9.14.2　扫描仪的工作原理

扫描仪捕获图像信息是通过灯管光源照射到被扫描的图像上，光源通过不透明原稿反射，或光源通过透明原稿进入到一个阵列称为电荷藕合器件的光敏元件，也称为CCD。CCD 接收光采样点，并将每个采样点的光波转换成随光强度的大小而变化的一系列电压脉冲。模拟/数字转换器将电压脉冲转换成计算机主机能识别的图像数据，控制扫描仪操作的扫描软件读这个数据，并将其组成一个计算机图像文件，存储到计算机的磁盘中。扫描仪的工作原理图如图 9-75 所示。

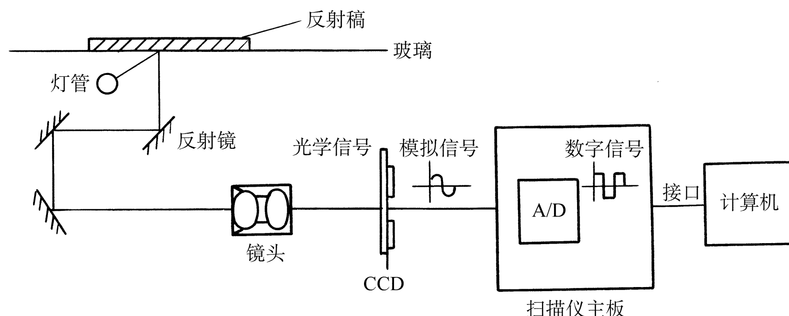



图 9-75　扫描仪的工作原理

## 9.14.3　扫描仪的工作过程

扫描仪的工作过程如图 9-76 所示。其扫描的一般工作过程如下所述。

开始扫描时，机内光源发出均匀光线照亮玻璃面板上的原稿，产生表示图像特征的反射光（反射稿）或透射光（透射稿）。反射光经过玻璃板和一组镜头，分成红、

绿、蓝 3 种颜色汇聚在 CCD 感光元件上，被 CCD 接受。其中空白的地方比有色彩的地方能反射更多的光。

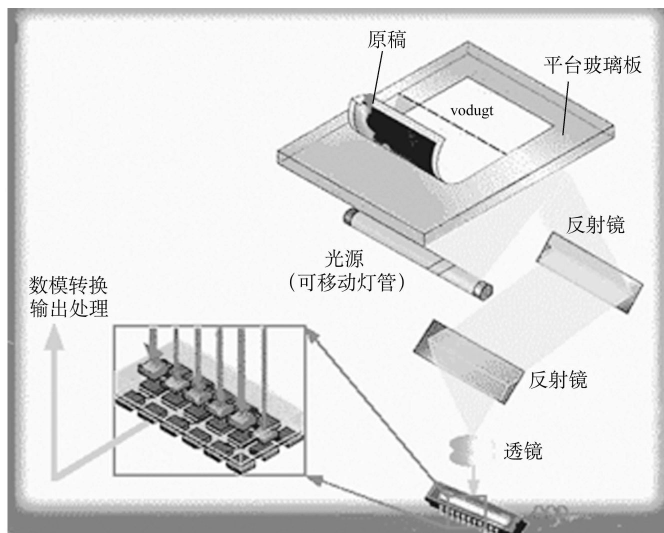



图 9-76　CCD 型扫描仪

步进电动机驱动扫描头在原稿下面移动，读取原稿信息。扫描仪的光源为长条形，照射到原稿上的光线经反射后穿过一个很窄的缝隙，形成沿 $x$ 方向的光带，经过一组反光镜，由光学透镜聚焦并进入分光镜。经过棱镜和红、绿、蓝三色滤色镜得到的 RGB 三条彩色光带分别照到各自的 CCD 上，CCD 将 RGB 光带转变为模拟电子信号，此信号又被 A/D 转换器转变为数字电子信号。

反映原稿图像的光信号转变为计算机能够接受的二进制数字电子信号，最后通过 USB 等接口送至计算机。扫描仪每扫描一行就得到原稿 $x$ 方向一行的图像信息，随着沿 $y$ 方向的移动，直至原稿全部被扫描。经由扫描仪得到的图像数据被暂存在缓冲器中，然后按照先后顺序把图像数据传输到计算机并存储起来。当扫描头完成对原稿的相对运动，将图稿全部扫描一遍，一幅完整的图像就输入到计算机中去了。

数字信息被送入计算机的相关处理程序，在此数据以图像应用程序能使用的格式存在。最后通过软件处理再现到计算机屏幕上。

因此，扫描仪的工作原理就是利用光电元件将检测到的光信号转换成电信号，再将电信号通过模拟/数字转换器转化为数字信号传输到计算机中。无论何种类型的扫描仪，它们的工作过程都是将光信号转变为电信号。所以，光电转换是它们的核心工作原理。扫描仪的性能取决于它把任意变化的模拟电平转换成数值的能力。

## 9.14.4　扫描仪的种类

### 1. 手持式扫描仪

手持式扫描仪外形很像超市收银员拿在手上使用的条形码扫描仪，绝大多数采用

CIS 技术，光学分辨率为 200DPI，有黑白、灰度、彩色多种类型，其中彩色类型一般为 18 位彩色，也有个别高档产品采用 CCD 作为感光器件，可实现真彩色扫描，效果较好。

**2. 小滚筒式扫描仪**

这是手持式扫描仪和平台式扫描仪的中间产品，绝大多数采用 CIS 技术，光学分辨率为 300DPI，有彩色和灰度两种彩色型号，一般为 24 位彩色。也有极少数小滚筒式扫描仪采用 CCD 技术，扫描效果明显优于 CIS 技术的产品。但由于结构限制，体积一般明显大于 CIS 技术的产品。滚筒式的设计是将扫描仪的镜头固定，而移动要扫描的物件，通过镜头来扫描。运作时就像打印机那样，要扫描的物件必须穿过机器再送出。因此，被扫描的物体不能太厚，这种扫描仪体积很小，但是使用起来有多种局限。如只能扫描薄的纸张，范围还不能超过扫描仪的大小。

**3. 平板式扫描仪**

平板式扫描仪是目前办公用扫描仪的主流产品，目前市面上大部分的扫描仪都属于平板式扫描仪，光学分辨率在 300 ~ 8000DPI 之间，色彩位数从 24 位到 48 位，扫描幅面一般为 A4 或者 A3。平板式的好处在于像使用复印机一样，只要把扫描仪的上盖打开，不管是书本、报纸、杂志、照片、底片都可以放上去扫描，相当方便，而且扫描出的效果也是所有常见类型扫描仪中最好的。

除了以上的几种扫描仪外，还有大幅面扫描仪、笔式扫描仪、条码扫描仪、底片扫描仪、实物扫描仪和 3D 扫描仪。其中条码扫描仪主要用于条码的扫描识别，笔式扫描仪主要用于文字识别。

### 9.14.5 扫描仪的光电器件

目前市场上扫描仪所使用的感光器件主要有 4 种，即光电倍增管、硅氧化物隔离 CCD、半导体隔离 CCD 和接触式感光器件（CIS 或 LIDE）。

**1. 光电倍增管**

这种扫描器件实际上是一种电子管，感光材料主要是金属铯的氧化物，并掺杂其他一些活性金属（主要是镧系金属）的氧化物进行改进，以提高其灵敏度和修正光谱曲线。用这种材料制成光电阴极，在光线的照射下，能够发射电子，称为光电子，经栅极加速放大后冲击阳极，形成电流。

在各种感光器件中，光电倍增管是性能最好的一种，无论在灵敏度，噪声系数还是动态范围上都遥遥领先于其他感光器件。更难能可贵的是它的输出信号在相当大范围上保持着高度的线性输出，使输出信号几乎不用做任何修正就可以获得准确的色彩还原。

同时，光电倍增管的温度系数极低，可以忽略不计，因此它几乎不受周围环境温度的影响。光电倍增管在各种感光器件中是生产成本最高的，而且由于一次只能扫描一个像素，因此扫描速度很慢，扫描一张图需要几十分钟。因此，它现在只用在最专业的鼓式扫描仪上。

**2. 硅氧化物隔离 CCD 和半导体隔离 CCD**

这两种感光器件与我们日常使用的半导体集成电路相似，在一片硅单晶上集成了几千到几万个光敏三极管。这些光敏三极管分为三列，分别用红、绿、蓝色的滤色镜罩住，从而实现彩色扫描。光敏三极管在受到光线照射时可以产生电流，经放大后输出。

该类感光器件近年性能提高很大，其高端产品的性能已经接近低档的光电倍增管产品。但由于数千个光敏三极管的距离很近（微米级），并且各三极管之间的绝缘是依靠半导体 PN 结来的绝缘，隔离电阻较小，因此，在各光敏三极管之间存在着明显的漏电现象，使各感光单元的信号产生相互干扰，降低了扫描仪的实际清晰度。

为了改善这一情况，可以采用硅氧化物隔离技术，在器件加工过程中，将各个光敏三极管之间的半导体单晶硅用 $SiO_2$ 替代，由于 $SiO_2$ 是非常好的绝缘材料，几乎杜绝了各光敏三极管之间的漏电现象，因而在两台扫描仪性能指标相同的情况下，使用硅氧化物隔离 CCD 的扫描仪的实际清晰度将有一个质的飞跃。

**3. 接触式感光器件**（CIS 或 LIDE）

CIS 技术或 LIDE 技术与 CCD 技术几乎是同时出现的，它使用的感光材料是用来制造光敏电阻的硫化镉，很容易制成一条长的阵列，而且生产成本只有半导体隔离 CCD 的 1/3，当时主要是用在低档黑白手持式扫描仪和传真机上，由于尺寸太大，无法使用镜头成像，只能依靠贴近目标来识别目标，因此光学分辨率最高只能达到 200DPI。就性能而言，接触式感光器件存在着严重的先天不足，首先由于不能使用镜头，只能贴近稿件扫描，其实际清晰度远远达不到标称指标，同时，硫化镉光敏电阻本身漏电很大，各感光单元之间干扰严重，进一步降低了清晰度。而且由于无法实现同时制造三条平行的感光单元同时实现三色扫描，接触式感光器件不能使用常用的冷阴极灯管，所以不得不使用 LED 发光二极管阵列作为光源，这种光源无论在光色还是在光线的均匀度上都是比较差的。而且由于 LED 阵列是由数百个发光二极管组成，一旦有一个损坏就意味着整个阵列的报废，因此这种产品的寿命比较短。

### 9.14.6　扫描仪的接口

扫描仪的常用接口类型有以下 3 种：

1）SCSI（小型计算机标准接口）。此接口最大的连接设备数为 8 个，通常最大的传输速度是 40MB/s，速度较快，一般连接高速的设备。SCSI 设备的安装较复杂，在 PC 机上一般要另加 SCSI 卡，容易产生硬件冲突，但是功能强大。

2）EPP（增强型并行接口）。一种增强了的双向并行传输接口，最高传输速度为 1.5MB/s。优点是不需在 PC 中用其他的卡，无限制连接数目（只要你有足够的端口），设备的安装及使用容易。缺点是速度比 SCSI 慢。此接口因安装和使用简单方便而在中低端对性能要求不高的场合取代 SCSI 接口。

3）USB（通用串行总线接口）。最多可连接 127 台外设，现在的 USB1.1 标准最高传输速度为 12MB/s，并且有一个辅通道用来传输低速数据。在将来如果有了 USB2.0 标准的扫描仪，速度可能会扩展到 480MB/s。具热插拔功能，即插即用。此接口的扫描仪随着 USB 标准在 Intel 的力推之下的确立和推广而逐渐普及。

### 9.14.7　扫描仪的分辨率

扫描仪的分辨率要从三个方面来确定：光学部分、硬件部分和软件部分。也就是说，扫描仪的分辨率等于其光学部件的分辨率加上其自身通过硬件及软件进行处理分析所得到的分辨率。

光学分辨率是扫描仪的光学部件在每平方英寸面积内所能捕捉到的实际的光点数，是指扫描仪 CCD（或者其他光电器件）的物理分辨率，也是扫描仪的真实分辨率，它的数值是由光电元件所能捕捉的像素点除以扫描仪水平最大可扫尺寸得到的数值。如分辨率为 1200DPI 的扫描仪，往往其光学部分的分辨率只占 400～600DPI。扩充部分的分辨率由硬件和软件联合生成，这个过程是通过计算机对图像进行分析，对空白部分进行数学填充所产生的（这一过程也称为插值处理）。

光学扫描与输出是一对一的，扫描到什么，输出的就是什么。经过计算机软硬件处理之后，输出的图像就会变得更逼真，分辨率会更高。目前市面上出售的扫描仪大都具有对分辨率的软、硬件扩充功能。有的扫描仪广告上写 9600×9600DPI，这只是通过软件插值得到的最大分辨率，并不是扫描仪真正的光学分辨率。所以对扫描仪来讲，其分辨率有光学分辨率（或称光学解析度）和最大分辨率之说，我们关心的是光学分辨率。

## 9.15　激光打印机

激光打印机是一种高度自动化的光机电一体化输出设备。主要由激光扫描系统和以墨粉与感光鼓为主的墨粉盒及电路部分组成。与点阵式打印机和普通喷墨打印机相比，激光打印机在打印质量和打印速度方面具有极大优势，因此日益成为主要的打印设备。目前，激光打印机普遍采用了以 USB、EPP/ECP 为代表的新型接口。这些新型接口不但具有较高的数据传输率，而且可实现双向数据传输。

### 9.15.1　激光打印机的工作原理

激光打印机是将激光扫描技术和电子照相技术相结合的印字输出设备。其基本工作原理可用图 9-77 描述。

二进制数据信息来自计算机，由视频控制转换为视频信号，再由视频接口/控制系统把视频信号转换为激光驱动信号，然后由激光扫描系统产生载有字符信息的激光束，最后由电子照相系统使激光束成像并转印到纸上输出。

激光打印机的印字过程包含以下 6 个步骤。

1）带电。在感光鼓（体）表面的上方设有一个充电的电晕电极，其中有一根屏蔽的钨丝，当转动感光鼓（体）的机械部件开始动作时，用高压电源对电晕电极加数千伏的高压。这样就会开始电晕放电，电晕电极放电时，钨丝周围的空气应会被电离，变成能导电的导体，使感光鼓表面带上正（负）电荷。电晕放电，就是在导体上加一定程度的电压，导体周围的空气（或其他气体）就会被电离，变成离子化。一般认为

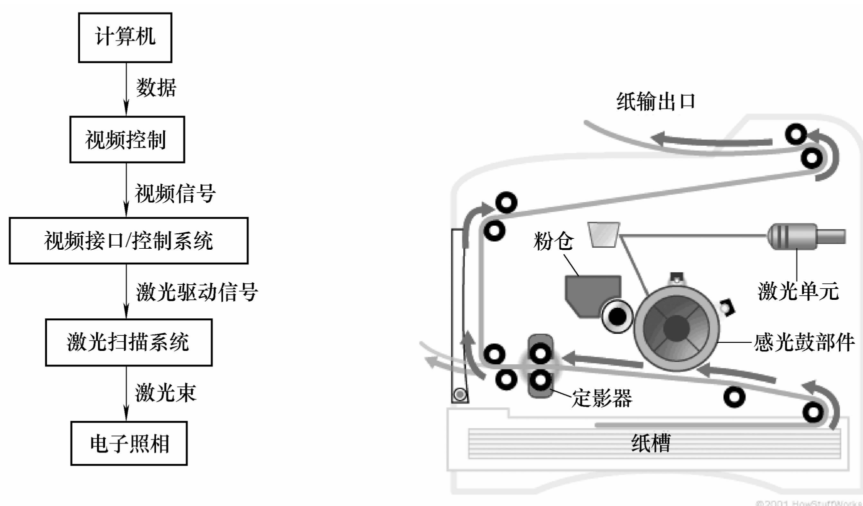



图 9-77　激光打印机基本工作原理框图

空气是非导电体，电离后就变成了导体。

2）曝光。随着带正（负）电荷的感光鼓（体）表面的转动，遇有激光源照射时，鼓表面曝光部分变为良导体，正（负）电荷流向地（电荷消失）。文字或图像以外的地方，即未曝光的鼓表面，仍保留有电荷，这样就产生了不可见的文字或图像的静电潜像。

3）显影（显像）。显影也称显像，随着鼓表面的转动，接着对静电潜像进行显像操作。显像就是用载体和着色剂（单成分或双成分墨粉）对潜像着色。载体带负（正）电荷，着色剂（墨粉）带正（负）电荷，这样着色剂就会裹附在载体周围，由于静电感应作用，着色剂就会被吸附在放电的鼓表面立即生成潜像的地方，使着色潜像变为可视图像。

4）转印。被显像的鼓表面的转动通过转印电晕电极时，显像后的图像即可转印在普通纸上。因为转印电晕电极使记录纸带有负（正）电荷，鼓（体）表面着色的图像带有正（负）电荷，这样，显像后的图像就能自动地转印在纸面上。

5）定影（固定）。图像从鼓面上转印在普通纸上之后，进一步通过定影器进行定影。定影器（或称固定器）有两种，一种是采用加热固定，即烘干器；另一种是利用压力固定，即压力辊。带有转印图像的记录纸，通过烘干器加热，或通过压力辊加压后使图像固定，使着色剂融化渗入纸纤维中，最后形成可永久保存的记录结果。

6）清除残像。转印过程中着色剂从鼓面上转印到纸面上时，鼓面上多少总会残留一些着色剂。为清除这些残留的着色剂，记录纸下面装有放电灯泡，其作用是消除鼓面上的电荷。经过放电灯泡照射后，可使残留的着色剂浮在鼓面上，进一步通过清扫时，这些残留的着色剂就会被刷掉。

印字过程经过上述六个步骤后，感光鼓面就进入下一个印字周期。

## 9.15.2　激光打印机的基本结构

激光打印机的基本结构由激光器、声光调制器、高频驱动、扫描器、同步器及光偏转器等部件组成。当计算机向打印机发送数据，打印机发送给打印机的处理器，处理器将这些数据组织成可以驱动打印引擎动作的类似数据表的信号组。对于激光打印机而言，这个信号组就是驱动激光头工作的一组脉冲信号。这些数据信号控制着激光的发射，扫描在硒鼓表面的光线不断变化，有的地方受到照射，电阻变小，电荷消失，也有的地方没有光线射到，仍保留有电荷。最终，硒鼓表面就形成了由电荷组成的潜影。图 9-78 为激光打印成像系统。

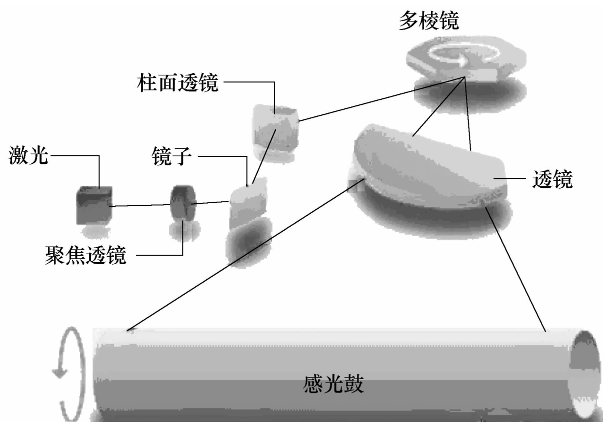



图 9-78　激光打印成像系统

墨粉表面带有电荷，其电荷与硒鼓表面的电荷极性相反，当带有电荷的硒鼓表面经过涂墨辊时，有电荷的部位就吸附了墨粉颗粒，潜影就变成了真正的影像。硒鼓转动的同时，另一组传动系统将打印纸送进来，经过一组电极，打印纸带上了与硒鼓表面极性相同但强得多的电荷，随后纸张经过带有墨粉的硒鼓，硒鼓表面的墨粉被吸引到打印纸上，图像就在纸张表面形成了。此时，墨粉和打印机仅仅是靠电荷的引力结合在一起，在打印纸被送出打印机之前，经过高温加热，塑料质的墨粉被熔化，在冷却过程中固着在纸张表面，形成清晰的字符被输出。

**1. 机械结构**

激光打印机的内部机械结构如图 9-79 所示，激光打印机的重要部件如墨粉盒、感光鼓、显影轧辊、显影磁铁、初级电晕放电极、清扫器等，都装置在墨粉盒内。当盒内墨粉用完后，可以将整个墨粉盒卸下更换。其中感光鼓是一个关键部件，一般用铝合金制成一个圆筒，鼓面上涂敷一层感光材料（如硒-碲-砷合金），例如 Canon 的激光打印机使用的是 OPC（有机光导）材料 CTL（Carrier Transport Lager）和 CGL（Carrier Generation Lager）。CGL 产生负电载流子，曝光后 CTL 传输负的载流子到表面，利用这个特性产生电子图像。

激光打印机的纸张传送机构和复印机相似。纸由一系列轧辊送进机器内，轧辊有

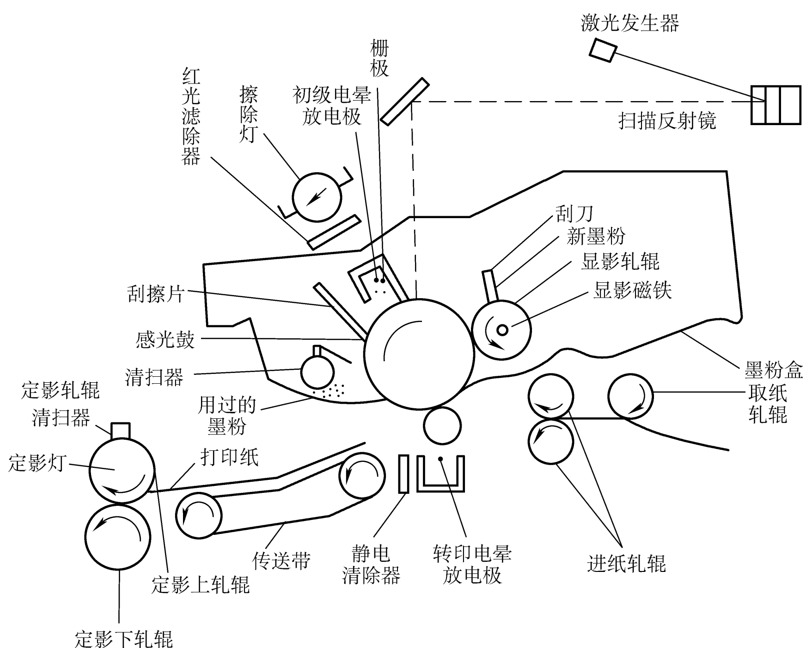



图 9-79　激光打印机内部结构示意图

的有动力驱动，有的没有。通常，有动力驱动的轧辊都是通过一系列的齿轮与电动机联在一起。主电动机采用步进电动机，当电动机转动时，通过齿轮离合器使某些轧辊独立地启动或停止。齿轮离合器的闭合由控制电动机的 CPU 控制。

打印开始时，纸张的前缘送往进纸轧辊。送纸时，离合器接通，使上下两个进纸轧辊都转动。在进纸过程中时间控制非常重要，纸的前线必须在正确的时刻到达感光鼓下面，以便鼓将影像的第一部分转印到正常位置上。其余的进纸系统使纸张对直向前移动。检测开关包括缺纸报告开关和出纸报告开关，纸用完后，及时报告 CPU。纸集存得过多过少，都会报告系统。纸送到出纸段时，出纸开关也会动作。这些由敏感元件构成的检测开关，将信号报告 CPU，随着纸张的移动 CPU 采取相应控制措施。CPU 中程序允许在一定的时间内，纸张通过一定距离。若纸张移动到某一部位时间过长，CPU 则认为是纸被卡住了，立即报告出错信息。

**2. 墨粉盒的主要零部件**

1）感光鼓。感光鼓是有机光导材料的简称，最早的感光鼓由硒蒸镀制得，所以仍称感光鼓为硒鼓。硒的特点是光导电特性，即在光照射下产生载流子，从而具有导电性，在暗状态下又成为绝缘体。

感光鼓的损害主要来自机械磨损和化学疲劳两方面，机械磨损是因为刮板和充电辊的机械接触导致，而化学疲劳主要由光的损害和印字机内环境的臭氧氧化引起。感光鼓是字符/图像信息的载体，所以是核心零件之一，其性能的好坏直接影响印字效果，其典型的缺陷有点缺陷、底灰、幻影等。

点缺陷指在进纸方向出现的规律性的黑点，主要起因是鼓面的机械损伤，如磕碰等；底灰是指在打印纸上出现的大面积的细小墨粉粒，主要由化学疲劳引起充电特性发生变化，以及机械磨损到一定阶段后导致；幻影是指等间距的重影。

2）显影磁辊。显影磁辊位于供粉仓内，磁辊的中心是固定的永磁铁。固定磁铁的外面是转动的铝套。磁铁的上下左右有四个磁极 N1、N2、S1、S2，它们有不同的磁强度，分别起到搬运墨粉（N2 极、S2 极）、堆集墨粉（N1 极）及显影（S1 极）等作用。辊套上也加有直流高压及交流电压。

从显影轧辊上把墨粉转移到感光鼓上去是通过接触显影和投射显影技术实现的。接触显影是直接把墨粉“涂”到感光鼓上，为保证墨粉只粘到潜像上，而不落到非潜像区而出现不该有的背景，降低打印质量，应使感光鼓和显影磁辊外套上的墨粉层不直接接触，而离开一个间隙。这样，就可防止污染，但由于间隙的存在，必须要有更强的电场，以驱使墨粉粒子跨过这个间距。加大感光鼓与显影磁辊套之间的直流偏压值就可以使墨粉粒子跨过这个间距，并将墨粉粒子搬动更大的距离，而到达鼓面上。

为防止高直流电压产生电场边缘效应而降低图像清晰度，采用直流和交流叠加的办法，在显影磁辊上是将 -560V 直流电压和 1600V 交流电压组合，直流电压作为交流电压的一个负偏压。墨粉离子由于与辊套表面的摩擦，又与其他墨粉粒子的摩擦带上负电荷。在交流负半周瞬间，墨粉粒子在显影极 S1 处受排斥力，从辊套上被推向感光鼓。交流变为正半周时刻，带负电荷的墨粉粒子又被吸回辊套。若此处感光鼓上没有潜像，墨粉粒子就如此往返跳动。反之，如鼓上有潜像，潜像区对墨粉粒子有足够的引力，墨粉不再返回辊套上，即构成投影显影过程。磁辊起搬运墨粉的作用，其表面的导电涂层，直接影响打印的质量，其磨损主要是机械磨损，导致上粉能力降低以及对墨粉的电性能有影响。

3）充电辊。充电辊给感光鼓以初始的电荷，其结构有两种，一是电晕丝；二是胶辊。电晕丝用于较早期的机型等，其缺点是易产生臭氧。现在的大多机型都用胶辊，采用胶辊后，首先降低了供电电压和供电装置的重量及成本；其次，降低了臭氧产生量。胶辊的缺点是表面易集灰从而影响充电特性和透湿性，使打印出现幻影等缺陷，特别是在低湿度和低温下更明显。

充电辊由三层组成，裹着金属轴的一层是导电泡沫橡胶层，导电橡胶外面是电阻层，最外面是保护层。金属轴是钢制的，导电橡胶层既提供了充电回路，又提供了充电辊对感光鼓表面的压力。电阻层的作用是限制从充电辊到感光鼓的充电电流。图 9-80 是充电辊充电回路。工作时，在充电辊和感光鼓之间施加了直流高压和交流高压，两者相互叠加。在交流的峰值时刻，充电辊就把电荷转移到感光鼓上，形成一条带状充电区。带状充电区在感光鼓上分布的疏密取决于交流的频率。印字速度越高，交流电压所需的频率也越高。充电时，直流穿过充电辊表面是均匀分布的，但是当遇到感光鼓涂层上出现一个针眼小孔的情况下，就可能导致一个大的直流电流，如同从整个充电辊上流出的短路电流，便感光鼓上相应的这一条充电区失去电荷，在纸上表现为一条水平黑线。充电辊所的电阻层起到了限制这个大电流的作用，而避免黑线故障。充电辊的最外层是保护层，防止对感光鼓的化学损害，同时可以限制进入导电橡胶层

的水分。在再生墨粉盒中，充电辊 PCR 是重要零件之一，其可能导致的缺陷是底灰、幻影等。

4）刮擦片。刮片是和感光鼓表面相接触的，目的是擦去鼓上的残留墨粉，有缺口或翘曲的刮擦片会漏过墨粉。刮不净的鼓面会在打印纸上产生不希望有的黑色垂直条纹。刮片前缘如因老化发生了缺损或翘曲，就不能再用，必须换上新的。

5）涂布片。涂布片用来保证墨粉均匀地涂布于磁辊的表面并使墨粉摩擦带电，如果出现明显的弯曲则必须更换，因为压力的降低可能导致墨粉大量分布于磁辊表面，当超过磁辊套时，就会出现垂直方向，宽达 8mm 的黑道。

6）辅助刮板。辅助刮板的作用是将刮板刮下来的墨粉收入废粉仓的作用，如果出现翘曲使它和感光鼓的贴合出现间隙就会出现撒粉，表现在纸张上就是沿进纸方向产生许多无规律的黑点。

7）墨粉。墨粉是打印的介质，根据其组成可分为双组和单组。双组粉用在鼓粉分离型感光鼓中，鼓粉一体鼓大多用单组粉。单组粉由色调剂（炭墨及色料等）、磁性物质（氧化铁等）、塑料组分和填料组成。所有这些组分都是微细颗粒，它们互相包络，形成粉的颜色及磁电性能。墨粉性能不仅关系到打印的品质，而且对印字机的相关装置及工作环境都有影响。那种认为打印效果越黑越好的观点这是一种误解，实际上越黑的粉色剂，磁性物质可能会越多，从而引起附着力降低，打印分辨率降低，以及鼓面及加热膜磨损加剧。

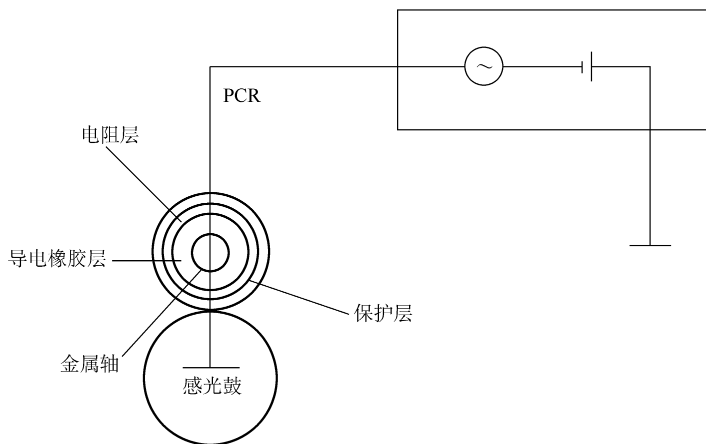



图 9-80　PCR 充电回路

### 3. 墨粉盒再生技术

对于鼓粉一体化的墨粉盒来说，整个墨粉盒是消耗材料。一个墨粉盒的价格大约是整机的十分之一。在较频繁打印的工作条件下，3 ~ 5 个月的耗费就可能达到一台整机的代价。目前激光印字机虽然大幅度降价，但消耗费用仍然是一笔不小的开支。因之，墨粉盒再生技术是激光印字机推广使用中的一个重要课题。

实际上，要将墨粉盒的的零部件设计成具有相同工作寿命是不可能的，也就是说

旧墨粉盒上的许多零部件还可继续工作。但那种只是简单地打开粉盒，加进墨粉的做法可能导致许多问题，甚至有损于打印机本身。正确做法应按照如图 9-81 所示的再生程序来进行旧墨粉盒的再生处理过程。

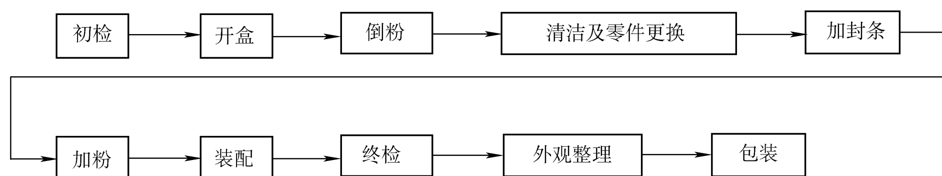



图 9-81　墨粉盒的再生处理过程

**4. 激光扫描系统**

激光打印机的激光扫描系统如图 9-82 所示。它的核心部件是激光写入部件和多面转镜。高中速激光打印机的光源都采用气体（He-Ne）激光器，用声光调制器对激光进

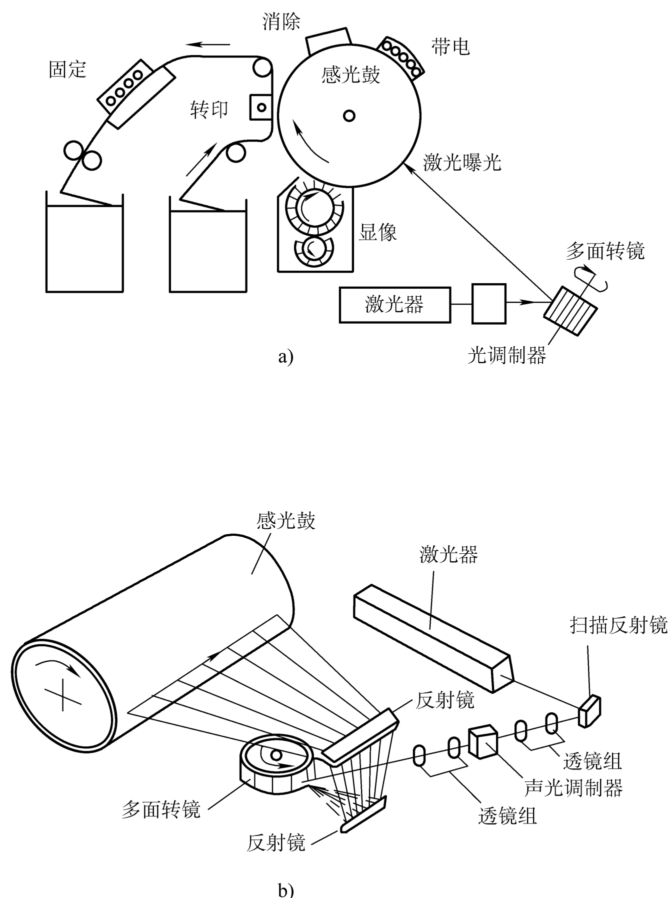



图 9-82　激光打印机的激光扫描系统

a）印字机构　b）光学系统

行调制。为拓宽调制频带，由激光器发生的激光束，需经聚焦透镜进行聚焦后再射入声光调制器。根据印字信息对激光束的光强度进行调制，为使印字光束在感光体表面形成所需的光点直径，还需经扩展透镜进行放大。

为使光束在感光体上进行全程扫描，需对光束进行偏转，为此需采用光偏转器，一般都使用多面转镜。由于多面转镜的每个转镜之间存在有误差，误差会降低光点间距的精度，为了消除这种误差，需采用柱面透镜和环形透镜进行校正。经过多面转镜偏转后的光束，必须经过一种称为 $F_{\theta}$ 透镜的扫描透镜，其目的是使经过多面转镜的光点束在感光鼓上进行不等速（不等间距）扫描的光点变为焦距等间距的光点。

采用半导体激光器（LD）的打印机，可以对 LD 直接进行调制，无需用声光调制器，其余部分基本相同。

多面转镜是一种用正多角柱的侧面作镜面，并由电动机驱动高速转动的多面镜，也是一个由多面镜和电动机组装为一体的组合体。多面转镜的性能直接影响到像素的排列精度，故对多面转镜和电动机转速的精度要求是很高的。

多面转镜发生在主扫描方向偏转角度的变动，主要是由多面转镜的分割精度、镜面精度和电动机转动无效行程等原因引起的。在偏转方向垂直面上的角度变动，是由多面镜的拐角和电动机上安装多面镜用法兰盘的间隙造成的。在镜面开始扫描时，采取扫描位置与时钟信号同步的方法进行补偿，可以适当降低对多面转镜的分割角度的精度要求。

**5. 电路**

1）控制电路。激光打印机的控制电路框图如图 9-83 所示。它是一个完整的被扩展的微型计算机系统。计算机系统主要包括 CPU、ROM、RAM、定时控制、I/O 控制、并行接口、串行接口等。该计算机系统通过并行接口或串行接口接收主机输入信号；通过字盘接口控制/接收字盘车信息；通过面板接口控制/接收操作面板信息；另外，还控制直流控制电路，再由直流控制电路控制定影控制、离合控制、各个驱动电动机、扫描电动机、激光发生器及各组高压电源等。

2）电源系统。激光打印机内有多组不同电源。一般有三组：+5V、-5V 和 +24V。+5V为所有逻辑集成电路芯片供电，同时还供给打印机中各个检测电路。-5V也供给一些逻辑集成电路芯片。+24V 用于冷却风扇、扫描电动机、擦除灯及一些离合器的开关，同时还是高压供电系统的电源。打印机打印期间，需要有特殊高压，-6000V用于初级电晕电极，-600V 用于电晕栅极，还有一组交流电压用于显影轧辊。各组高压都接在墨粉盒里，由于墨粉盒是可更换件，所以高压不能接在电晕极、显影轧辊和其他部件上，而是接在一些连接器上，通过各个连接器与墨粉盒接通。各组电源因机型不同而不同。

**6. 开关及安全装置**

激光打印机设置有许多开关，控制电路利用这些开关检测并显示打印机各个部件的工作状态。许多开关还带有安全器件，以防伤害操作人员或损坏打印机。各个开关及其功能列举如下。

1）纸盒插入开关。用以报告 CPU，纸盒已经插入。

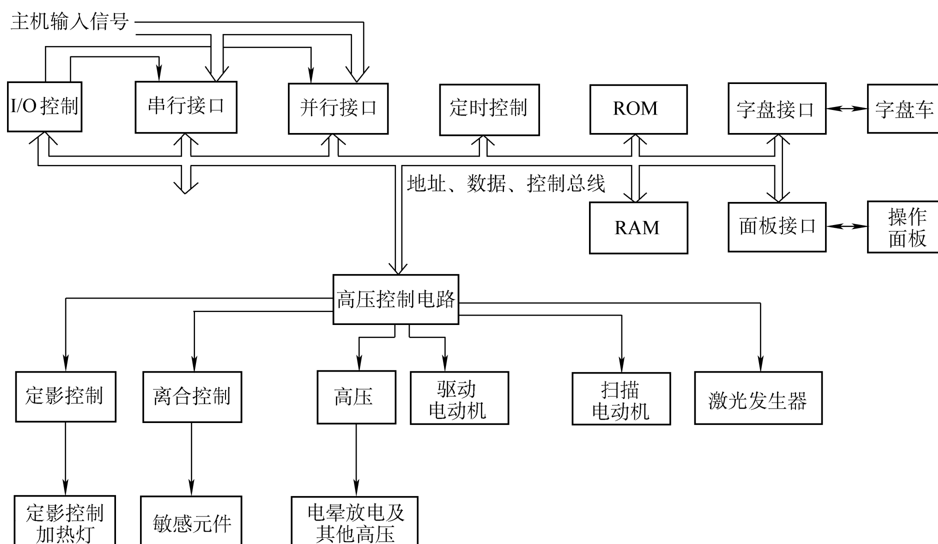



图 9-83　激光打印机控制电路框图

2）纸盒型号开关。该开关共有 3 个，共同显示插入的纸盒类型。

3）缺纸开关。用以报告纸盒中纸太少或已用完。

4）墨粉盒插入开关。用以向 CPU 报告墨粉盒插入。

5）感光鼓感光度开关。该开关共 3 个，共同显示感光鼓的感光灵敏度。

6）墨粉数量过少开关。当墨粉快用完时，产生报告信号。

7）送纸开关。纸张进入印字起点时，向 CPU 报告，若未及时到位，CPU 会认为纸被卡住。

8）盖板连动安全开关。当印字机的盖板打开时，自动断开 +24V 和高压供电线路，以防触电。

9）防过热开关。用以当定影轧辊温度超过 90℃时，自动报警关机。

## 9.15.3　激光打印机的主要接口类型

### 1. USB 接口

USB（Universal Serial Bus，即通用串行总线）是一种可以简化 PC 与外设之间互连的标准化连接器，它支持各种 PC 与外设之间的连接，还可实现数字多媒体集成。USB 接口的主要特点是：即插即用，可热插拔，具有自动配置能力，用户只要简单地将外设插入到 PC 以外的总线中，PC 就能自动识别和配置 USB 设备。而且带宽更大，增加外设时无需在 PC 内添加接口卡，多个 USB 集线器可相互传送数据，使 PC 可以用全新的方式控制外设。

现在满足 USB 要求的外设有打印输出设备、调制解调器、键盘、鼠标、光驱、游戏手柄、软驱、扫描仪和音箱等。目前推出的激光、喷墨印字机一般都设置有 USB 接口。USB 总线标准由 1.1 版升级到 2.0 版后，传输率由 120MB/s 增加到了 480MB/s。

**2. EPP/ECP 接口**

标准并行接口 SPP（Standard Parallel Port）是专为打印输出而设计的，广泛应用于印字输出设备中。它是一种单向并口，数据只能由计算机输出，而不能进行数据输入。这种接口的实现简单，但传输速度较低，无法满足高速印字输出设备的要求。因此近年来，高速印字输出设备中都普遍采用了新型并行接口 EPP 或 ECP。

1）增强型并行接口 EPP。EPP 协议最初目的是在满足向下兼容现有并行接口的基础上寻求一种高性能的并行接口。它仍采用与 SPP 相同的 36 芯插座，但它支持主机和外设之间的双向数据交换，其传输速度可以达到（1 ~2）MB/s。

2）扩展性能并口 ECP。ECP 是适用于打印机和扫描仪的一种高性能的双向并口，具有 16 个字节的 FIFO，并且支持 DMA 功能。在不降低系统性能的前提下减轻了计算机 CPU 的负担，提高了应用系统的整体性能。更为重要的是，ECP 把其他几种并口模式都纳入 ECP 模式的定义中，可以把并口的操作模式设置为 SPP、EPP 或 ECP，从而构成了一个完整的并口系统。ECP 还允许在进行数据传输时进行实时数据压缩，采用这种方式进行数据传输可进一步提高传输速度。

## 9.16　光标阅读器

计算机处理数据往往从高速收集原始数据开始。由于计算机处理速度、效率、可靠性飞速提高，需要找出一个能与之相适应的数据收集和输入系统，即解决数据进入计算机的“瓶颈”问题。据估计，常规的数据输入工作占去数据处理总费用的 40% ~ 50%。由于数据输入量越来越大，矛盾就更加尖锐。例如在我国所实行的大规模普通高校招生考试中，要求 10 天内评阅出几十万张标准化试卷，采用人海战术、人工评阅，耗时耗力，而且考分要经过人工多次抄录和键盘输入，才能进入计算机中去处理，这样很难保证进度和准确性，且不能排除人为的干扰因素。因此，迫切需要一种能适应标准化评卷的数据录入设备。光标阅读器是解决上述问题的途径之一，它作为一种光机电一体化高速数据录入设备，具有高速、高效和准确的特点。

### 9.16.1　光标阅读器的工作原理

光标阅读器可识别人们在信息卡上限定位置的涂写状态，用有和无两种状态来确定该位置是被涂写还是未被涂写。它利用光电传感器高速采集信息卡上的涂写信号有无，根据光电变换原理，把光信号转换为电信号，由处理器对信号进行判断处理和识别。图 9-84 为环绕分拣式全自动型光标阅读器结构图。

光标阅读器涉及光学原理、光电转换、计算机技术、数据处理和识别、精密机械等方面，其结构主要主要由机械传动、光电传感器、微处理器、控制面板及处理、控制、识别软件等部分所组成。结构如图 9-85 所示。

**1. 光电传感器**

光电传感器由发光管（LED）和光敏管（PT）组成。发光管是光源，常用半导体红外管，它的体积与晶体灯相似，当加上电压时，就从一端的窗口发出光线。光敏管

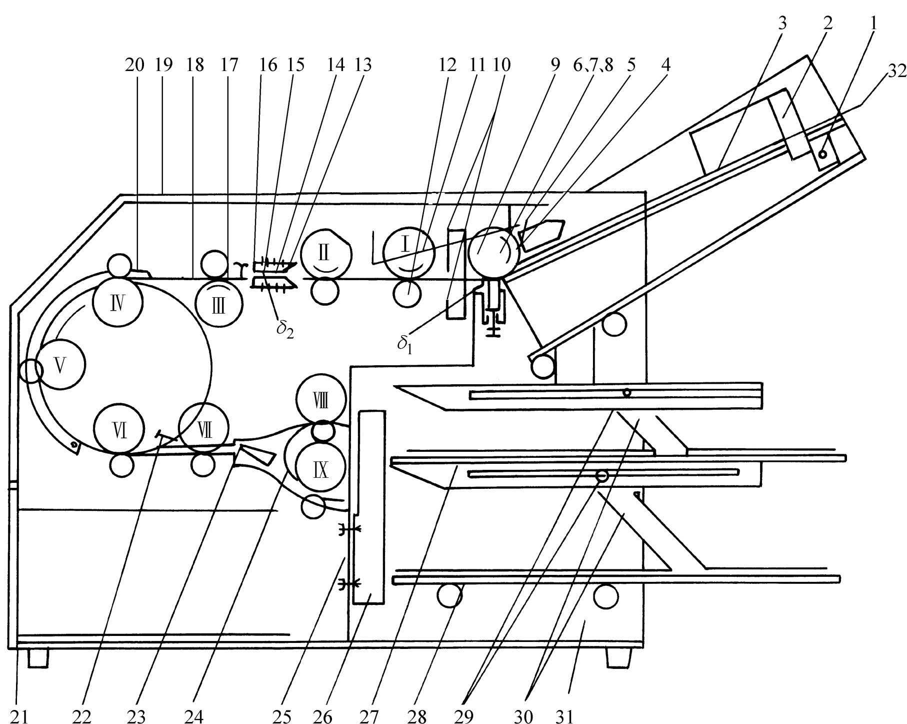



图 9-84　环绕分拣式全自动型光标阅读器示意图

1—扭矩轴　2—挡纸板　3—托纸板总成　4—测纸探头　5，18—走纸板　6—摩头　7—锁紧螺钉　8，17—调整螺钉　9—搓纸轮　10—重张探头　11—走纸轮　12—压轮　13—探头　14，16—固定螺钉　15—面板　19—上盖　20—曲板　21，25—侧板　22—导板　23—翻板　24—桃形导板　26，30—出纸挡板　27—上接纸斗　28—下接纸斗　29—旋钮　31—主板　32—信息卡

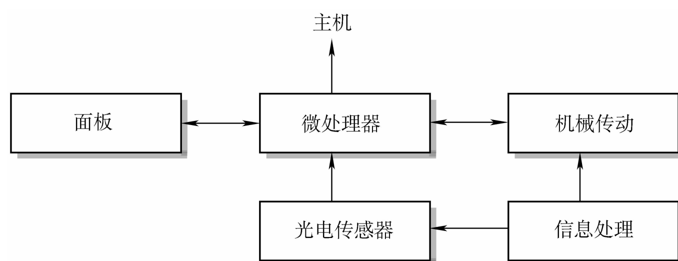



图 9-85　光标阅读器的结构

是接收红外光的器件，外形与发光管类似，当加上电压并有光照射到窗口时，电路中电流就发生变化，电流大小随照射光射的强弱而变化。从发光管发出的光线形成光束，照射在信息卡上，产生反射、透射、漫射等各种光线，光敏管放于不同位置上可接收到信息卡上反射光或透射光。

如图 9-86 所示，当发光管光线照射到信息卡上涂黑符号时，透过的光线减弱，反射光也减弱，光敏管接受到的光强度减弱，导致光敏管电流变小，输出信号电压变小。反之，光束照射到信息卡上没涂黑的符号时，光敏管接收到的透射光和反射光强，产生信号电压大。这样就把信息卡上是否有涂黑符号变成了电信号传送给处理器去处理，就完成了对涂黑符号的识别。由于透射方式因信息卡纸张内有杂质及厚薄不均匀而造成透射光不一致性，因此目前一般不采用，绝大部分均采用反射方式。

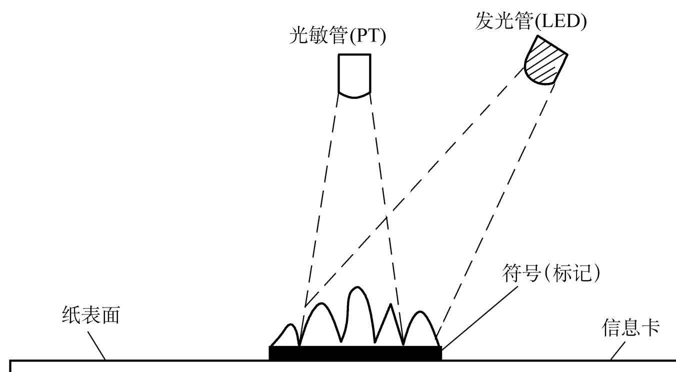



图 9-86　光电传感器原理（反射式）

光电探头分成单面和双面探头两种。双面型探头要求信息卡双面印刷，同时读取双面信息，它对信息卡纸张要求严格，而且要有两套处理器同时处理。一个或二个发光管和一个光敏管组合起来构成一个识别单元，可完成对信息卡的识别，把若干个单元排列成一行就组成一个光电传感器（也称光电探头）。每个光电探头需要多少个单元组成，由信息卡列数决定。列与列之间距离我国暂定为 5.00mm。信息卡尺寸分别为 64K、32K、16K、10K 几种。由此即可决定探头的单元总数。

**2. 信息卡**

光电探头每次识别信息卡上一行信息，图 9-87 所示的信息卡格式有如下符号：

1）同步符号。同步符号设置在信息卡的两边或单边，为等宽、等间隔的黑色线条，信息卡在对应光电单元下通过时，光电探头单元检测出同步符号，同时通知处理器，处理器使用光电探头的其他单元采集与同步符号同一行的所有信息，当整个信息卡全部通过探头后，处理器就采集到信息卡上的所有符号，处理后，就会确定卡上涂黑符号所在位置。同步符号编号和探头的列号组成一个阵列，阵列的大小为同步符号数与探头单元数乘积。例如，32K 信息卡同步符号为 51 个，探头光电单元为 23 列，则阵列数为 23（$X$）×51（$Y$）。

2）检测点和检测线。检测点和线是印刷在信息卡上的正规符号，其作用是当直纸歪斜时，探头光电单元就对不准对应行上的信息符号，发生符号识别错误。为此，当一张信息卡完全通过探头时，要判断检测点、线识别是否正确，如发生错误，整个信息卡读取失败，发出错误信号。

3）符号大小。同步符号长宽和间隔均有规定，信息符号的大小和黑度也有要求，

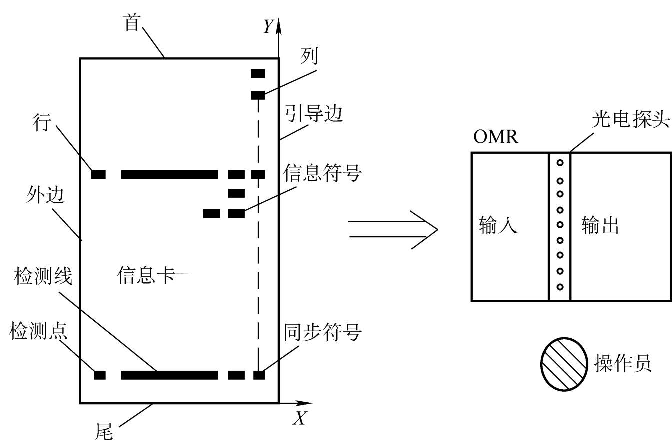



图 9-87　信息卡识别

如果差别过大，超出探头识别的允许范围，检测出信号参差太大，易出现错误。

使用 OMR 完成数据输入，首先要根据要求设计出各种各样信息卡，信息卡的 *X* 方向信息符号数及间隔大小要与光电探头的单元数和间隔大小一致，*Y* 方向同步符号数量没有明确规定，信息位含义要预先定义。例如，国家考试管理中心对信息卡尺寸和各种符号位置、尺寸做了规定，如图 9-88 所示。

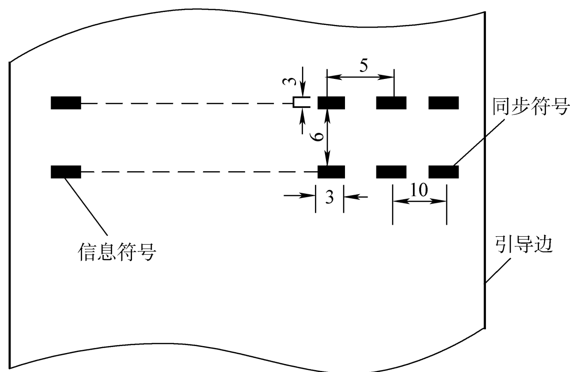



图 9-88　信息卡内符号位置和尺寸

阵列的每个交点称为信息位，为保证信息位识别的准确性，对信息位涂点（符号）大小和黑度均有具体要求，不能随意涂写。考试管理中心规定，符号为矩形框，涂满涂黑，使用 2B 铅笔和其他笔涂写。信息卡经过多人涂写和修改，修改擦除的不干净，造成表面脏黑，加之纸张本身有杂质又不光滑，因而很难做到像印刷的那样一致。为此除采用许多技术措施来解决这些问题外，还要使灵敏度能根据涂写情况进行调整和设置。

信息卡在印刷时也可能产生偏差。一般两次印刷会造成套印偏差，同步符号与信息符号不在同一行上，裁切也易发生偏差，使同一行的信息符号经过光电探头时，远离同步符号的信息符号就对不准探头光电单元，检测不到信息符号。因此对印刷裁切误差也做了规定，印刷误差为 ±0.1mm，裁切误差为 ±0.5mm。

**3. 机械传动**

机械传动部分的功能是把一叠信息卡，每次自动分拣出一张，由传动系统平稳、平直、迅速地使信息卡顺利通过光电探头，然后整齐地放置在托纸盘上。平板式一般

只有一个输出托纸盘，它输出信息卡的顺序与输入信息卡顺序相反，当错卡通过探头被检测出时，自动停止运送，发出信号报警，由人把错卡取出，再重新启动；环绕式输出卡顺序与输入卡顺序相同，信息卡要环绕180°，设置上下两个输出托纸盘，当发现错卡时，传动系统不停止运送，自动分拣错卡装入另一托纸盘。

机械传动部分包括直流微电动机、变速装置、分纸装置、导纸驱动部分、环绕部分和托纸盘等。直流电动机通过变速装置驱动分纸装置和导纸轮将信息卡送入光电探头下。直流微电动机可以是直流电动机、伺服电动机或步进电动机，要求电动机起动和停止延迟时间小，转速均匀，并且速度可以控制。

分纸装置把信息卡一张张分开送给导纸轮，要求尽量减少或不发生双张和空转搓不动纸的情况，双张会漏阅信息卡，空转使阅卡实际速度大大降低，发生上述两种情况是与分纸轮、托纸盒和纸三者间摩擦力有关，也与纸的厚度、硬度、光洁度、粘度等因素有关，要求信息卡一般在80g/mm$^2$以上。

导纸轮是把分纸装置送采的信息卡继续向前搓动，必须保证信息卡走直、走正，要使卡的引导边紧靠导纸板。这样才能保证信息卡通过光电探头时，进行正确识别。安装时要保证光电探头与导纸板位置之间达到一定精度，同时，要使信息卡通过光电探头时尽可能不出现卡纸现象。环绕机构要保证每张卡高速反转，做到信息卡走正、不卡纸，输出分拣正确可靠，输出托纸盘要保证输出卡排列整齐有序。

对机械传动部分的要求是：无双张、无卡纸、无空转，卡移动位置正确、可靠、平稳，出纸顺畅、传动噪声小，并能长期连续工作。传送带和搓纸轮橡皮圈更换次数少。

卡在移动时，由于摩擦会产生纸尘，这就要求光电探头要密封，否则粘上纸尘会严重影响识别准确度。

**4. 信息处理部分**

信息处理部分由中央处理器（CPU）、存贮器、数模转换（A/D）或模数转换（D/A）装置、驱动电动机和接口组成。

1）中央处理器（CPU）。一般采用微处理器。也可采用单片机如Intel 8051、8098和8096等，要根据处理速度、存贮器容量、外部接口能力选择。

2）存贮器。包括RAM、PROM和电擦除ROM。RAM中存放缓冲数据，EPROM存放控制、识别程序，ROM存放探头光电管参数表，表中数值可进行修改。

3）数模转换A/D或模数转换D/A装置。把光电探头检测到的模拟信号转换成数字信号。

4）驱动电动机。驱动电动机转动，改变转动速度并能迅速启动和制动电动机。

5）接口。与主机连接可采用RS-232C串行口、IEEE488接口、并行口DMA接口，还可直接输出打印机。

信息处理部分的主要功能如下所述。

1）对信息卡进行识别。首先是读卡，通过D/A或A/D在信息卡移动时，一行行读取它上面的全部信息位，将其处理后存放于RAM中，然后进行识别，按卡格式要求从RAM中提取有用信息，对其进行比较判断等分析处理，选择所需信息，以字符串形

式送到主机系统中去。

2）系统自检。脱机走纸，进行同步符号检测，改变电动机速度。

3）接收主机命令进行处理并给出响应。微处理器是光标阅读器（OMR）的核心部分，由它控制 OMR 协调各部分动作并执行识别、处理等功能。

**5. 面板**

操作面板分为前面板和后面板，前面板有字码显示和按键。显示 OMR 工作状态和读卡计数值。按键用来设置 OMR 工作方式、工作状态并进行自检。后面板设置电源插座、开关、指示灯、接口插座等。

### 9.16.2 光标阅读器的特点

从识别方式区分，光电阅读器分为两种，即光学字符阅读器 OCR（Optical Character Reader）和光标阅读器 OMR（Optical Mark Reader）。

OCR 可识别印刷体英文字母、数字及各种符号。识别印刷体汉字的 OCR 虽有产品供应，但识别准确度还有一定限制。当然 OCR 使用十分方便，而且应用范围广，但结构复杂，价格昂贵。

OMR 用于识别标记（Mark），这种标记是涂在纸卡的确定位置上，且形状受到限制，仅识别该位置上有无标记两种状态。有标记位置填涂，无标记位置不填涂。这种光电阅读器结构简单，价格便宜，有利于广泛使用推广。它有如下优点：

1）提高速度、降低成本。OMR 只需几分钟就可完成一个键盘操作员一天的工作量，因此，减少了人力，降低了成本。

2）提高准确性。OMR 输入的数据文件为源文件，不是转录和副本，且具有对输入文件的检查能力，能发现错误文件并进行联机改错，大大减少出错机会。

3）提高灵活性。精心设计的信息卡能给用户提供多功能有效的数据输入方式。

### 9.16.3 光标阅读器的应用领域

OMR 的应用始于标准化考试。我国普通高校招生采取全国统一拟题、统一答案、统一评分的方式，规模之大是世界罕见的。以湖南省为例：每年有 20 多万考生参加考试，答题卡为 100 多万张。如人工阅卷，需用大量人力投入紧张工作，突出的问题是评分误差大。尤其是实行标准化考试后，选择和判断题大量增加，如英语，100 分中就有 85 分为选择判断题。由于采用 OMR，高速准确地评分，大大节省人力、场地，可信度高，获得普遍应用。所以人们通称 OMR 为阅卷机。但 OMR 的应用远不止如此。

OMR 已在全国高考中普遍应用，它的效益、高速、准确度已得到社会的一致公认，并产生了明显的社会和经济效益，使科学技术迅速转化为生产力。目前，OMR 正向大、中学校推广，在中学会考、自学成才考试、成人高考、电大考试中将大量采用。

OMR 具有广阔的应用前景，正向各个领域扩展。OMR 在以下领域有明显应用前景：

1）制造业。用于工资单、质量控制、存货管理等。

2）销售。用于市场调查、商品管理、进出货单录入、售后服务等。

3）教育。用于考试、学生注册、教学评估、科研成果评审。

4）国家机关。用于人口普查、民主选举、干部考核、人员培训、挑选等。

5）医疗。用于健康检查、病员管理。

6）银行、税务、保险。用于各种传票录入记账等。

7）统计部门。用于各类社会组织的信息调查、民意测验及快速信息统计。

8）知识竞赛。各团体和电视台组织的各类知识竞赛答题卡评分。

9）自选号码彩票录入。

## 9.17　光盘

进入多媒体时代，大容量的信息处理技术显得更为重要。作为支持这一技术的光盘存储技术尤其引人注目，它可以随时进行信息的写入/读出。

音乐、图像、计算机等输出的信息，以长短、间距各异的凹坑形式被刻录在光盘上。通过聚焦的微细激光写入、读出这些信息。盘而上的凹坑尺寸有九种规格，宽 0.5μm，长从 0.87μm 到 3.18μm、高 0.13μm。将一列凹坑称为纹迹，轨道间隙为 1.6μm。因此，光盘能够高密度地记录信息。

若要从凹坑中存取信息，必须使聚焦后的激光尺寸小于轨道间隙。透镜的聚焦能力与开口数有关。聚焦光斑的直径 $D$ 可按下式求出：

$$D = \frac{0.5\lambda}{NA}$$

$$NA = \frac{\text{透镜直径}}{2 \times \text{焦点距离}}$$

光盘播放时使用专门设计的透镜，$NA$ 最大为 0.5 左右。因为半导体激光的波长是 0.78μm，所以 $D$ 约为 0.8μm。

光盘每秒大约转五周。在旋转过程中，盘面只是微微地上下振动，而电动机轴是左右振动。因此，为了能使激光聚焦处置在盘面之上，并且不超出一个纹迹范围搜索信息，必须使用极高精度的电子装置控制激光的位置。利用盘面反射光测量出透镜和盘面之间的距离，并将该信号反馈给调节器，通过可使透镜上下移动的伺服机构（调节器）控制激光焦点位置。另外，为了追踪摄影，光束实际上被分成三份，它们对盘面的反射光的比例不同，得到的追踪信号也不相吻合，将该信号反馈给能左右摆动的机构，以此控制激光位置。

只有激光光源能够聚焦成细小的光斑。若是普通的白色光源，即使是最高级的透镜也无法聚焦成像激光光源那样小的光斑。图 9-89 是激光经透镜聚焦后焦点落在盘面之上的示意图。由于凹坑处的反射光发生散射，因此返回至透镜的反射光量减少，而没有凹坑部位的反射光量却非常高。由此，可以读出 0 和 1 的数据信号。

光盘的类型如下所述。

**1. 只读型光盘存储器**（CD-ROM）

自 1985 年 Philips 和 Sony 公布了在光盘上记录计算机数据的黄皮书以来，CD-ROM

驱动器便在计算机领域得到了广泛的应用。CD-ROM 光盘不仅可交叉存储大容量的文字、声音、图形和图像等多种媒体的数字化信息，而且便于快速检索，因此 CD-ROM 驱动器已成为多媒体计算机中的标准配置之一。MPC 标准已经对 CD-ROM 的数据传输速率和所支持的数据格式进行了规定。MPC 3 标准要求 CD-ROM 驱动器的数据传输率为 600KB/s（4 倍速），并支持 CD-ROM、CD-ROM XA、Photo CD、Video CD 和 CD-Ⅰ等光盘格式。

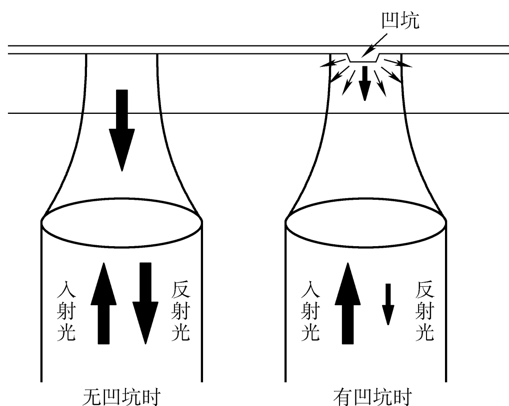



图 9-89 聚焦的激光读取凹坑信息

CD-ROM 是发行多媒体节目的优选载体，原因是它的存储容量大，制造成本低，大批量生产时成本低廉。目前，大量的文献资料、视听材料、教育节目、影视节目、游戏、图书、计算机软件等都通过 CD-ROM 来传播。

**2. 追记型光盘存储器**（CD-R）

信息时代的加速到来使得越来越多的数据需要保存，需要交换。由于 CD-ROM 是只读式光盘，因此用户自己无法利用 CD-ROM 对数据进行备份和交换。在 CD-R 刻录机大批量进入市场以前，用户的唯一选择就是采用可擦写光盘机。

可擦写光盘机根据其记录原理的不同，有磁光驱动器 MO 和相变驱动器 PD。虽然这两种产品较早进入市场，但是记录在 MO 或 PD 盘片上的数据无法在广泛使用的 CD-ROM 驱动器上读取，因此难以实现数据交换和数据分发，更不可能制作自己的 CD、VCD 或 CD-ROM 节目。

CD-R 的出现适时地解决了上述问题。CD-R 是英文 CD Recordable 的简称，中文简称刻录机。CD-R 标准是由 Philips 公司于 1990 年制定的，目前已成为工业界广泛认可的标准。CD-R 的另一英文名称是 CD-WO（Write Once），顾名思义，就是只允许写一次，写完以后，记录在 CD-R 盘上的信息无法被改写，但可以像 CD-ROM 盘片一样，在 CD-ROM 驱动器和 CD-R 驱动器上被反复地读取多次。

CD-R 盘与 CD-ROM 盘相比有许多共同之处，它们的主要差别在于 CD-R 盘上增加了一层有机染料作为记录层，反射层用金，而不是 CD-ROM 中的铝。当写入激光束聚焦到记录层上时，染料被加热后烧溶，形成一系列代表信息的凹坑。这些凹坑与 CD-ROM 盘上的凹坑类似，但 CD-ROM 盘上的凹坑是用金属压模压出的。

CD-R 驱动器中使用的光学读/写头与 CD-ROM 的光学读出头类似，只是其激光功率受写入信号的调制。CD-R 驱动器刻录时，在要形成凹坑的地方，半导体激光器的输出功率变大；不形成凹坑的地方，输出功率变小。在读出时，与 CD-ROM 一样，要输出恒定的小功率。

**3. 可擦写型光盘存储器**

1）MO 可擦写光盘存储器。MO 是英文 Magnet-Optical 的缩写，是指利用激光与磁

性共同作用的结果记录信息的光磁盘。MO 盘用来存储信息的媒体与软磁盘相似，但其信息记录密度和容量却比软磁盘高得多。这是由于记录时在盘的上面施加磁场，而在盘下面用激光照射。磁场作用于盘面上的区域比较大，而激光通过光学系统聚焦于盘面的光点直径只有 1 ~ 2μm。在受光区域，激光的光能转化为热能，并使磁性层受热而变得不稳定，即变得易受磁场影响。这样，在直径只有 1 ~ 2μm 的极小区域内就可记录下一个单位的信息。通常的磁性记录方式存储一个单位的信息时，要占用相当大的区域，因而磁道也相应变宽，盘上记录信息的总量也就很小。

MO 盘片虽然比硬盘和软盘便宜和耐用，但是与 CD-R 盘片相比就显得比较昂贵了。MO 的致命缺点是不能用普通 CD-ROM 驱动器读出，因而不能满足信息社会对计算机数据进行交换和数据分发的要求，在网络技术和网络建设不发达的地方，这一问题日趋突出和严重。

2）可擦写光盘存储器 CD-RW。为了使可擦写相变光盘与 CD-ROM 和 CD-R 兼容，早在 1995 年 4 月，飞利浦公司就提出了与 CD-ROM 和 CD-R 兼容的相变型可擦写光盘驱动器 CD-E（CD Erasable）。CD-E 得到了包括 IBM、HP、Mitsubishi 、Mitsumi、松下电器、Sony、3M 及 Olympus 等公司的支持。1996 年 10 月，Philips、Sony、HP、Mitsubishi 和 Ricoh 五家公司共同宣布了这一新的可擦写 CD 标准，并将 CD-E 更名为 CD-RW（CD-ReWritable）。CD-RW 标准的制定标志着工业界可以开发并向市场提供这种新产品。

CD-RW 兼容 CD-ROM 和 CD-R，CD-RW 驱动器允许用户读取 CD-ROM、CD-R 和 CD-RW 盘，刻录 CD-R 盘，擦除和重写 CD-RW 盘。由于 CD-RW 采用 CD-UDF 文件结构，因此 CD-RW 可作为一台海量软盘驱动器使用，也可在 DVD-ROM 驱动器读取，具有更广泛的应用前景。

MO 虽然有不少特点，但是它们只能被其他同类驱动器读取，不能在广泛流行的 CD-ROM 上使用。MO 没有市场共享性，购买者只是将它们用于数据备份，因此难以实现数据交换和数据分发，更不可能制作自己的 CD、VCD 或 CD-ROM 节目。因此 MO 很难在市场上流行起来。

CD-R 是可记录光盘市场上的后起之秀，虽然只能刻录一次，但由于它与广泛使用的 CD-ROM 兼容，并具有较低的记录成本和很高的数据可靠性赢得了众多计算机用户的普遍欢迎。CD-R 目前是各种光盘存储产品中发展最迅猛的一种。CD-R 刻录机的价格相对几年前已下跌了很大幅度。在国外，CD-R 刻录机正在逐步取代 CD-ROM 驱动器而成为计算机的一种标准配置。

CD-RW 是一个已经得到众多公司和用户普遍支持的可擦写光盘标准。由于 CD-RW 仍沿用了 CD 的 EFM 调制方式和 CIR 检纠错方法，CD-RW 盘与 CD-ROM 盘具有相同的物理格式和逻辑格式，因此 CD-RW 驱动器与 CD-R 驱动器的光学、机械及电子部分类似，一些零部件甚至可以互换，这将大大节省 CD-RW 的开发和生产费用，降低 CD-RW 驱动器的成本，使 CD-RW 未来可能迅速在可擦写光盘产品市场占有一定的份额。

可擦写型结构中包含利用磁光效应的 MO 记录层和利用相位变化效应的 PC 记录层。表 9-3 汇总了三种类型光盘的特征。

表 9-3　三种类型光盘的特征

| 类型 | 种类 | 特征 | 用途 |
|---|---|---|---|
| 只读型 | CD，CD-ROM<br>激光光盘<br>DVD<br>DVD-ROM | 可大量复制 | 音乐、电影、卡拉 OK，计算机软件电子词典、地图、目录 |
| 追记型 | CD-ROM | 证据性<br>不必担心误删除<br>可追加更正 | 文本文件<br>图像文件<br>保存用文本文件等 |
| 可擦写型 | MD<br>CD-RAM<br>DVD-RAM | 可以反复使用（MD、PC） | 计算机外部存储录音、录像、短时文件（文本、图像） |

光盘不仅用于音乐，还用于图像的录制、计算机的存储等。近几年，由于高密度记录技术的进步，以及顺应多媒体时代追求图像的高清晰化的潮流等原因，开发了 DVD（数字化录像光盘）。除了图像处理，DVD 还广泛用于计算机的外部存储等，因此，DVD 已成为通用的数字光盘的略称。可以说，光盘是一件巧妙地将电子技术、机械技术、光技术融于一体的杰出作品，今后必将还会不断发展。

## 9.18　光电鼠标

世界上最早的鼠标诞生于 1964 年，它是由美国人道格 · 恩格尔巴特发明的。鼠标这个产品从它的出现到现在已经超过了 40 年，但是鼠标产品的基本结构却没有发生过多大的改变，最多只是从普通的按键式鼠标改进成为轨迹球之类的。而鼠标产品中最为重要的定位系统，到目前为止也只有机械识别和光学定位两种而已，光电鼠标近几年来开始逐渐流行起来，如图 9-90 所示。1983 年至 1984 年，罗技研发了第一款光电学机械鼠标。光机结构鼠标的问世，将鼠标产品这一重要的电脑外设产品推向了一个新纪元。从 1999 年至今，光电鼠标的发展速度迅猛，其普及率在全球范围内几乎超过了 90%，可以说是目前最主流的鼠标类型。



图 9-90　光电鼠标

### 9.18.1　光电鼠标的工作原理

光电鼠标定位的工作流程是：发光二极管照亮采样表面，对比度强烈的待采样影像通过透镜在 CMOS 上成像，CMOS 将光学影像转化为矩阵电信号传输给光电鼠标内部的一块专用图像分析芯片（DSP，即数字微处理器）。当鼠标移动时，DSP 则将此影像

信号与存储的上一采样周期的影像进行比较分析，然后发送一个位移距离信号到接口电路。接口电路对由 DSP 发来的位移信号进行整合处理，而已传入计算机内部的位移信号再经过驱动程序的进一步处理，最终在系统中形成光标的位移。光电鼠标的定位原理如图 9-91 所示。

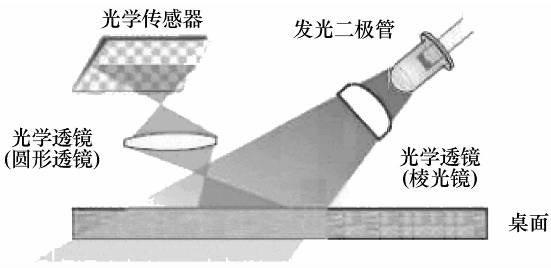



图 9-91　光电鼠标定位原理

## 9.18.2　光电鼠标的结构

光电鼠标主要由发光二极管、固定夹、光学透镜组件、光学传感器、接口控制器芯片及微动开关 6 部分元器件组成，如图 9-92 所示。

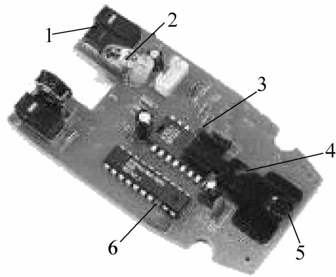



图 9-92　光电鼠标的组成
1—微动开关　2—为滚轮服务的二极管
3—光学传感器　4—固定夹　5—隐藏在固定夹下的发光二极管
6—接口控制器芯片

（1）发光二极管　图 9-93 中的发光二极管相当于光电鼠标的光源，其主要任务是满足光学传感器的拍摄需要，将所要拍摄的“路况”照亮。除此以外，发光二极管还被用来满足光电式的滚轮的需要。为光学传感器服务的发光二极管在鼠标“尾部”，为固定夹所遮盖；而为光电式滚轮服务的发光二极管则在鼠标“头部”，在滚轮位置附近。

（2）固定夹　负责照亮鼠标底部的发光二极管拥有很强的亮度，为了避免射出的光线干扰其他元器件工作，并且使光线通过透镜后能量更加集中，所以发光二极管上覆盖了固定夹，如图 9-94 所示。固定夹颜色为黑色，因为黑色吸收光线的能力最好。

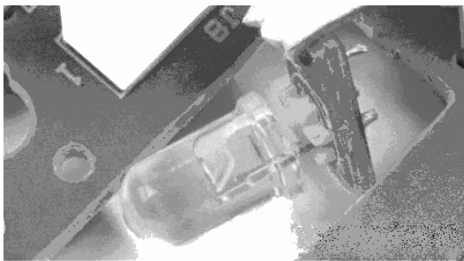


图 9-93　光电鼠标内部的发光二极管

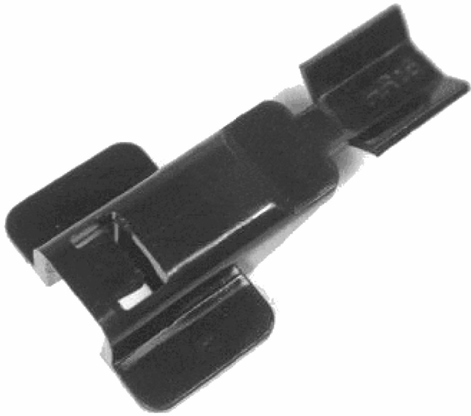


图 9-94　光电鼠标的固定夹

（3）光学透镜组件　光学透镜组件放在光电鼠标底部，光学透镜组件由一个棱光镜和一个圆形透镜组成。其中，棱光镜负责将发光二极管发出的光线传送至鼠标的底部，并予以照亮。圆形透镜则相当于一台摄像机的镜头，它负责将已经被照亮的鼠标底部图像传送至光学感应器底部的小孔中。光电鼠标的透镜如图 9-95 所示。

（4）光学传感器　光学传感器是光电鼠标的核心部件，“CMOS 感光器”和“数字信号处理器（DSP）”是其中最重要的两部分。CMOS 感光器是一个由数百个光电器件组成的矩阵，用来拍摄鼠标物理位移的画面。光学传感器会将拍摄的光信号进行放大并投射到 CMOS 矩阵上形成帧，然后再将成帧的图像由光信号转换为电信号，传输至数字信号处理器进行处理。DSP 对相邻帧之间差别进行除噪和分析后，将得出的位移信息通过接口电路传给计算机。

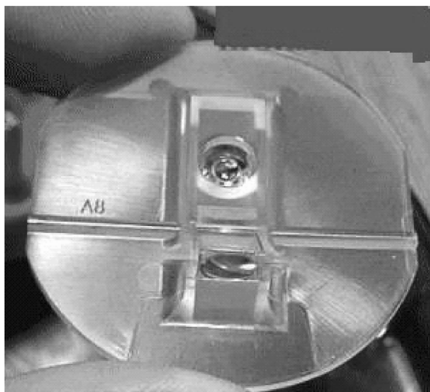


图 9-95　光电鼠标的透镜

（5）接口控制器芯片　接口控制器芯片负责管理光电鼠标的接口电路部分，使鼠标可以通过 USB、PS/2 等接口与 PC 相连。基于成本方面考虑，各品牌的光电鼠标一般都采用第三方的接口控制器芯片，而像赛普拉斯、凌阳、EMC 都是常见的接口控制器芯片厂商。另外，有的光电鼠标选用了具备接口控制器功能的光学传感器（如原相公司的 PAN401 光学传感器），所以在这类光电鼠标内部是无法发现独立的接口控制器芯片的。

（6）微动开关　使用光电鼠标时打交道最多的是鼠标按键，而鼠标按键一一对应着内部的微动开关，所以按键板设计和微动开关的品质共同决定了鼠标的手感。微动开关的质量还影响着光电鼠标的故障率。光电鼠标采用的微动开关如图 9-96 所示。

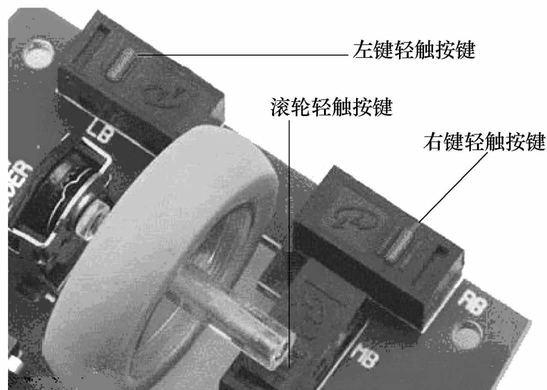



图 9-96　光电鼠标采用的微动开关

### 9.18.3　光电鼠标的技术核心

光电鼠标的技术核心是光学传感器，它是一套扫描分析系统，它会不断发出脉冲光波扫描鼠标底部的平面，得到一张张图片进行分析后确定鼠标的运动方向和轨迹。光学传感器主要是由 CMOS 图像感应器和 DSP 数字信号处理器两大部分组成。前者负责收集鼠标底部平面的信息，并且将所有信息转化为二进制数据。后者对这些数据进行比较，由此来计算出鼠标的运动轨迹。光电鼠标性能参数如分辨率、采样频率等都是由光学传感器所决定的。

分辨率的单位是 DPI，即鼠标移动每英寸的采样点数。光电鼠标在工作的时候会不断产生光电脉冲，每秒产生的脉冲越多，鼠标也就越灵敏。目前主流光学鼠标的分辨率为 400/800/1000DPI。

采样频率是指图像感应器每秒采集分析的能力。度量单位是帧/s。早期的光学引擎采样率仅有 1500 帧/s，即每秒中只能解析 1500 次。这仅仅相当于 0.3556m/s（14in/s）的运动速度。而人类手臂的运动速度能达到 0.762m/s（30in/s）。尤其是玩一些第一人称射击游戏时，低采样率的鼠标会非常不灵敏。此后光学引擎的技术不断发展，采样率也达到了 6000 帧以上。

图像处理能力是分辨率与感应器的乘积，它反映了 DSP 数字信号处理器的计算能力。一般光电鼠标的感应器为 $22 \times 22 = 484$ 像素。当鼠标的采样率为 1500 帧的时候，光学引擎的图像处理能力为 $484 \times 1500 = 72.6$ 万个像素。

# 第10章　在军事方面的应用

## 10.1　电磁炮

电磁炮是利用电磁发射技术制成的一种先进的动能杀伤武器，与传统的大炮将火药燃气压力作用于弹丸不同，电磁炮是利用电磁系统中电磁场的作用力，其作用的时间要长得多，可大大提高弹丸的速度和射程，因而引起了世界各国军事家们的关注。自从20世纪80年代初期以来，电磁炮在未来武器的发展计划中，已成为越来越重要的部分。

### 10.1.1　概述

长期以来，人们使用的枪、炮以至火箭的发射，都借助于化学燃料的爆炸，因为气体膨胀速度的限制，炮弹实际所能达到的发射速度约为2km/s。由于炮筒承受压力所限，炮弹质量也不能超过100kg。火箭不受气体膨胀速度的限制，只要不断喷射反应物质就能不断获得动量，虽可达高速度，但需相当长的加速时间，且火箭的发动机、燃料质量可以高达有效负荷的130倍，这严重影响了它的效率。

用电磁能量推进弹体的思想早在19世纪就提出来了。1845年，曾有人绕制了一些线圈，利用线圈的电磁力将一根金属棒射出了近20m远。1901年，挪威物理学家伯克兰造出了世界上第一门电磁线圈炮，能把10kg的弹体加速到100m/s。1920年，法国人维勒鲁斯又发明了电磁轨道炮。20世纪70年代，澳大利亚国立大学试制了一门电磁炮，首次成功地将3.3g的弹体加速到5.9km/s。1982年，他们又制成一门威力更大的电磁炮，把2.2g的弹体加速到10km/s，远远超过了常规大炮的威力。1980年，美国研究人员用电磁炮发射了一颗质量为317g的弹丸，飞行速度为4.2km/s。1987年，美国还研制成“雷电”电磁炮，将弹丸加速到6km/s。1990年代，美国又研制成功机动型的多发电磁炮和反战术导弹电磁炮。目前，舰载、（坦克）车载电磁炮都已进入试验阶段。

把电磁炮用于发射人造卫星，探索宇宙的想法也已有50年了，但由于缺乏储存能量的适当手段而无法实现。近10年来，由于储能领域取得巨大成果，大大推进了电磁炮的研究，美国战略防御机构对反导弹技术的研究已集中到电磁炮装置上，认为它除能提供摧毁飞行中的导弹的方法之外，还提供通过高速碰撞引发核聚变，以低费用把有效负荷发射到空间去，以及合成新材料等。

电磁推力是一种脉冲动力，它比火药推力大10倍，因而电磁炮可以把炮弹加速到高速，打破了常规炮弹初速低于2000m/s的界限，而且电磁推力能分布在发射装置整个长度上，比火药发射弹丸更容易控制。电磁炮发射的几乎全是有效负荷，电磁炮利用电磁力可以推进弹头到50km/s的超高速状态，常规武器望尘莫及，具有战略性武器

的功能，正因为这样，电磁炮才成为人们关注的对象。图 10-1 为英国 BAE 系统公司将为美国海军研制的电磁炮的效果图。




图 10-1　电磁炮示意图

### 10.1.2　电磁炮的原理和结构

电磁炮是利用电磁力代替火药爆炸力来加速弹丸的电磁发射系统，它主要由电源、高速开关、加速装置和炮弹四部分组成。目前，国外所研制的电磁炮，根据结构和原理的不同，可分为以下几种类型：

**1. 感应炮**

感应炮又称交流同轴线圈炮。它是电磁炮的最早形式，由加速线圈和弹丸线圈构成。感应炮根据通电线圈之间磁场的相互作用原理而工作的，加速线圈固定在炮管中，当它通入交变电流时，产生的交变磁场就会在弹丸线圈中产生感应电流，感应电流的磁场与加速线圈电流的磁场互相作用，产生磁场力，使弹丸加速运动并发射出去。

感应炮由一排固定的驱动线圈组成。发射体在驱动线圈内滑动，发射体表面上也套有一个或多个弹射线圈（见图 10-2），这些线圈通过与电源轨道相连接的电刷引入电流，也可通过电磁感应产生电流。

它的工作原理是根据两个同轴载流线圈之间的相互作用力正比于通过两线圈的电流强度和互感梯度的乘积，即：

$$F = KI_1 I_2 \frac{\partial I_1}{\partial L}$$

式中，$L$ 为互感系数。当两线圈电流同绕行方向时为引力，反向则为斥力。为使抛射体加速，启动线圈的电流方向必须反复地转换，使抛射体受前面的驱动线圈牵引，而受后面驱动线圈推动。为此，驱动线圈的电流必须与抛射体的运动同

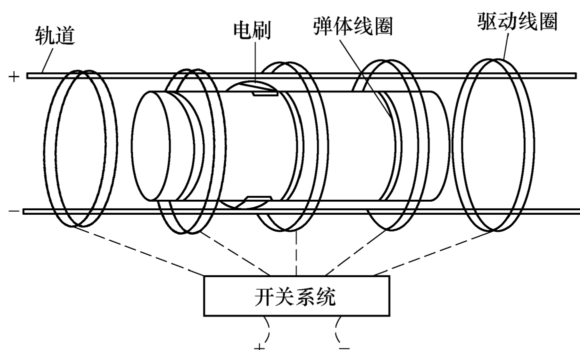



图 10-2　感应炮

步，即当抛射体接近和离开某一驱动线圈时，电流才通过该驱动线圈，因此需要一个开关系统来适时地控制。

由于感应炮耦合系数较高，故比轨道炮更为有效。据报道，美国电磁发射有限公司在感应炮的实验中，已获得的最大加速度达 2 亿 $g$，相当于在 2cm 的距离上将一抛射体从静止状态加速到 6km/s 的速度。

**2. 轨道炮**

轨道炮是利用轨道电流间相互作用的安培力把弹丸发射出去，它由两根平行钢轨和一个抛射体所组成（见图 10-3）。抛射体一般是一块滑块，它是两根轨道之间唯一的电的连接体。当电流从一根轨道流经抛射体，然后沿着另一根轨道流回时，由载流直导线周围空间磁场可知，两轨中的电流产生一个垂直于两轨平面的磁场，这磁场与通有电流的抛射体的相互作用，根据安培力的方向（见图 10-3），抛射体便沿轨道被加速。

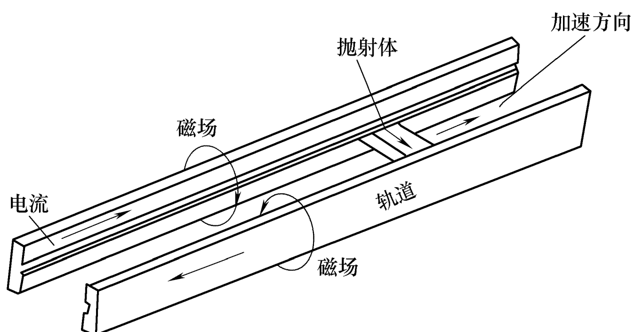



图 10-3　轨道炮示意图

为估计安培力的大小，可粗略的认为轨道是两条长直导线，截面半径为 $R$，电流从无限远处沿一轨道流至抛射体处，经抛射体再沿另一轨道流向无限远处，则任一载流道轨在抛射体上距轨道为 $r$ 处的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}$$

抛射体上长为 $\mathrm{d}r$ 一段所受的安培力为 $\mathrm{d}F = BI\mathrm{d}r$，故当电流通过两轨道时，抛射体所受到的安培力为

$$F = 2\int BI\mathrm{d}r = 2\int_R^{R+L} \frac{\mu_0 I}{4\pi r} I\mathrm{d}r = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi}\ln\frac{R+L}{R}$$

式中　$\mu_0$——真空中的磁导率；

$L$——抛射体在两道轨之间的长度。

要获得极高的速度，就需要极大的加速力，也就要求有极大的电能供应。尽管上面的计算是从粗略的电流模型得出的结果，但有 $F \propto I^2$，说明只要电流足够大，就可以获得大的加速力。

**3. 电热炮**

电热炮的原理完全不同于上述两种电磁炮，其结构也有多种形式。最简单的一种是采用一般的炮管，管内设置有连接到等离子体燃烧器上的电极，燃烧器安装在炮后膛的末端。当等离子体燃烧器两极间加上高压时，会产生一道电弧，使放在两极间的等离子体生成材料（如聚乙烯）蒸发，蒸发后的材料变成过热的高压等离子体，从而使弹丸加速。

### 10.1.3　电磁炮的特点

电磁炮与常规火炮相比，有以下特点：

1）速度快、动能大。各种常规火炮的炮弹速度不大于2km/s，各种导弹速度一般不大于7.5km/s，而电磁发射可使投射体速度从每秒几米提高到每秒几百千米。从理论上讲，电磁发射的极限速度是光速，但在地面发射的投射体速度一般不宜超过5～8km/s，若速度过大则由于空气阻力大而使投射体速度下降过快和烧蚀过大。由于电磁炮速度大，其投射体动能就大，破坏目标的能力就大。

2）加速度大。电磁炮的加速度一般为10万～100万个$g$，而导弹的加速度约为10万个$g$。电磁炮加速度大，达到最大速度时间为0.1～100ms；而导弹达到最大速度的时间需几秒到100多秒。

3）易多发、连发。由于电磁炮速度大，达到同样的动能其炮弹质量比火炮炮弹质量要小，有利于实现多管、多发、连发，可做到每分钟几十发到几千发。电磁炮质量小也有利于连发时的自动装填。

4）命中精度高。与普通火炮比，电磁炮没有圆形炮管，弹丸体积小，质量轻，使其在飞行时的空气阻力很小，因而电磁炮的发射稳定性好、初速度高、射程远。另一方面，电磁炮的速度精度是由电压、电流控制的，与火炮相比，控制精度高。此外，由于电磁炮速度、加速度大，因此其攻击目标的时间短，攻击快速移动目标的提前量比较准确。

5）发射成本低。电磁炮的能源是电能，比火炮用火药作能源便宜。尽管1台电磁炮及1台电磁炮炮弹相应的价格比一台火炮及一台火炮炮弹要贵得多，但是电磁炮与火炮相比在攻击命中同样的目标时所需要抛炮及炮弹的数量要少得多。而且若干发电磁炮弹比起同样作用的导弹价格便宜得多。从发射能量的成本来看，常规火炮的发射药产生每兆焦耳能量需10美元，而电磁炮只需0.1美元。而且电磁炮还可以省去火炮的药筒和发射装置，故而质量轻、体积小、结构简单、运输及后勤保障等方面更为安全可靠和方便。电磁发射装置发射某些卫星比用火箭发射费用要低得多。据资料显示，用电磁发射装置将1kg有效载荷发射到低地球轨道的费用只需要几美元，而使用便宜的火箭完成该任务也需要几百美元，二者的发射成本相差2个数量级。

6）电磁炮利用电磁力所作的功作为发射能量，不会产生强大的冲击波和弥漫的烟雾，因而具有良好的隐蔽性。电磁炮可根据目标的性质和距离，调节、选择适当的能量来调整弹丸的射程。常规高射速炮初速约为1.3km/s，若用它攻击速度为250m/s的飞机，成功率大概为60%；若攻击500m/s的飞机，成功率为40%。现在我们若要用电磁炮攻击上述飞机会如何呢？实验表明，用初速4km/s的电磁炮攻击上述飞机的成

功概率接近 100%。

### 10.1.4　电磁炮的应用领域

1）用于空间反导系统。电磁炮由于初速度极高，可用于摧毁空间的低轨道卫星和导弹，还可以拦截由舰只和装甲发射的导弹。因此，在美国的“星球大战”计划中，电磁轨道炮成为一项主要研究的任务。

2）用于防空系统。美军认为可用电磁炮代替高射武器和防空导弹飞行防空任务，美国正在研制长 7.5m、发射速度为 500 发/min、射程达几十千米的电磁炮，准备替代舰上的“火神——方阵防空系统”，用它不仅能打击临空的各种飞机，还能在远距离拦截空对舰导弹。英国也正在积极研制用于装甲车的防空电磁炮。美国正在研制的轨道电磁炮，初速度能够达到 7 倍音速，在 GPS 的引导下，炮弹在 1min 穿出大气层，在太空滑飞 4min 后，重返大气层，然后以 5 马赫的速度下落。

2009 年 2 月，美国海军用一门电磁炮无需火药发射炮弹，炮弹速度达到 7 倍音速。美国海军期望电磁炮成为美海军未来战舰的主力武器。图 10-4 为电磁炮发射瞬间，图 10-5 为电磁炮炮弹击中目标瞬间。美国海军研究局正在继续研发舰载电磁轨道炮，该武器可在 6min 之内将炮弹打到 402.336km（250mile）远的地方。成为一种“以炮弹的成本达到导弹的射程”的致命武器。

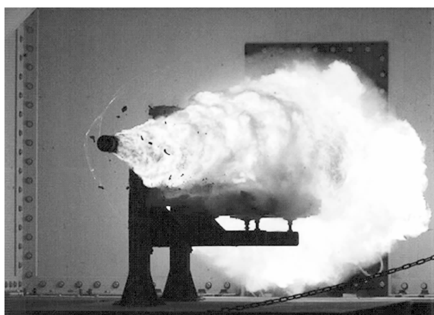


图 10-4　电磁炮发射瞬间




图 10-5　电磁炮炮弹击中目标瞬间

3）用于反装甲武器。美国的打靶试验证明，电磁炮是对付坦克装甲的有效手段，发射质量为 50g、速度为 3km/s 的炮弹，可穿透 25.4mm 厚的装甲。有关资料还报道，用一种电磁炮做试验，完全可以穿透模拟的 T-72、T-80 坦克的装甲厚度。由此可见，电磁炮具有很强的穿透能力，是非常优良的反装甲武器。

4）用于改装常规火炮。随着电磁发射技术的发展，在普通火炮的炮口加装电磁加速系统，可大大提高火炮的射程。美国利用这一技术，已将火炮射程加大到 150km。

5）用于航天领域。电磁发射技术可用于地对空的定向发射有效载荷、发射卫星，也可在太空推动航天器进行轨道转移。

6）在交通领域，用电磁发射原理制造电磁列车，使用原铁路轨道，其成本仅是磁悬浮车的 1/4。还可以制造磁流体喷水推进舰船。

7）在工业方面，可用其原理制造电磁抽油机，代替目前油田的机械抽油机，从而

大幅提高抽油效率并降低成本。

## 10.2　红外热像仪

红外热像仪是一种二维平面成像的红外系统，它通过光学系统将红外辐射能量聚集在红外探测器上，并转换为电子视频信号，经过电子学处理，形成被测目标的红外热图像，该图像用显示器显示出来。

### 10.2.1　红外热像仪的工作过程

图 10-6 所示的红外热像仪是一种成像装置。它是利用目标与周围环境之间由于温度与发射率的差异所产生的热对比度不同，而把红外辐射能量密度分布图显示出来，成为“热像”。由于人的视觉对红外光不敏感，所以热像仪必须具有把红外光变成可见光的功能，将红外图像变为可见图像。



图 10-6　红外热像仪

在红外热像仪中，红外图像转换成可见图像分两步进行，第一步是利用对红外辐射敏感的红外探测器把红外辐射变为电信号，该信号的大小可以反映出红外辐射的强弱；第二步是通过电视显像系统将反映目标红外辐射分布的电子视频信号在电视荧光屏上显示出来，实现从电到光的转换，最后得到反映目标热像的可在热像仪中具体实现由红外光变电信号、又由电信号变可见光的转换功能是由热像仪各个部件完成的。

当前使用的热像仪大都采用光机扫描，这种热像仪主要由光学系统、扫描器红外探测器、信号处理电路和显示记录装置等几部分组成，图 10-7 为热像仪工作过程的原理方框图。

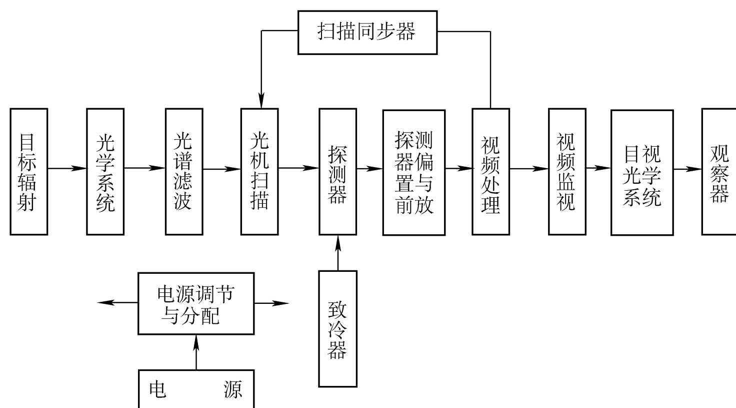



图 10-7　热像仪工作过程的原理图

**1. 热成像光学系统**

红外光学系统的作用是会聚被测目标的红外辐射，经过光学和空间滤波，将景物的辐射热聚焦到探测元件的焦平面上。由于探测器的尺寸很小，所以系统的瞬时视场也很小，一般为毫弧度数量级。为了对径向几十度、纬向几十度的物面成像，需借助于扫描器以瞬时视场为单位，由探测器连续地分解图像的方法，移动光学系统，从而实现大视场成像。

热成像光学系统的设计中，除需考虑上述一般红外光学系统的特点外，还应考虑热成像系统的特点。为了对空间目标进行扫描成像，对扫描器的安置位置应特别注意。对于物面扫描方式，扫描器安置在成像系统之前，这时系统尺寸大，功率消耗大，对光学系统的成像质量影响较小。如扫描器位于会聚光路中，则系统尺寸小，功率消耗小，但影响光学系统的成像质量。此外，由于衍射极限的限制，热像仪的分辨率较低，因此，必须有大的孔径，而这又会使整个系统重量加大，成本增高。

图 10-8 所示为由反射望远系统和准直透镜组成的热成像光学系统实例。该热成像光学系统的物镜采用了卡塞格伦系统。为了使像质满足要求，后组（相当于望远镜目镜）采用三片式锗透镜，准直透镜组采用二片式锗透镜。行扫描八面外反射转鼓安置在望远系统的出瞳位置上。为了减小帧扫描镜的尺寸与准直透镜的孔径，应使摆镜在结构尺寸能安排的情况下，尽量靠近行扫描八面外反射转鼓。

**2. 热像仪用红外探测器**

红外探测器是热像仪的核心部件。在现代热成像装置中广泛应用了基于窄禁带半导体材料的光子探测器，其中，HgCdTe 器件占大多数。这种器件之所以受到重视，主要是它具有高的探测率和较合适的工作温度，而且其工作波段可以通过改变材料中 CdTe 和 HgTe 的组分配比加以调整。

原则上，选择高探测率的探测器最好，而对探测器的响应时间也有一定要求，它不应低于瞬时视场在探测器上的驻留时间，同时还要求探测器的输出阻抗与紧接在后面的电路参数相匹配，这样才能获得较好的传输效率。此外，在致冷方面，要求工作温度不能太低，致冷量不能太大。总之，热像仪的性能、维修的方便性及外型尺寸决定了采用探测器及致冷系统的类型。

热像仪可用于研究很宽温度范围的物体，其中包括 $T = 300\text{K}$ 的目标。一般说来，研究低温目标（T = 310 ~ 320K）使用 HgCdTe 探测器最有利，但是随着目标温度的增加，使用 InSb 探测器可能更为有利。

**3. 信号的处理**

在热像仪中，红外探测器输出的信号非常微弱，只有通过充分放大和处理后才能加以显示，因此信号放大和处理电路是热成像装置中的重要组成部分。一般，热像仪利用隔直流电路将探测器信号耦合到放大电路中，这样既可以抑制背景，又可消除探测器上的直流偏置电位，还能把探测器的 $1/f$ 噪声的干扰减至最小。此外，在设计电路时，必须考虑信号电平及各级所需增益。一般探测器噪声电平可达数十微伏，而显示器需要几十伏甚至一百伏以上的输入，因此净增益约需 $10^7$ 倍以上。有信号处理电路能提供大的动态范围，这需要采用自动增益控制技术。

通常，探测器所处空间有限，并且还可能处于运动机构上，所以在探测器上进行信号处理十分困难。为此常在靠近探测器的地方放置小型前置放大器，使弱信号经过适当放大后，通过低阻抗屏蔽式的电缆，传输到信号处理电路上。可以说，前置放大器是整个信号处理系统中最关键的部分，它的噪声指数必须很低，其动态范围也不宜过大，因它受到输入端探测器噪声电平和允许的最大输出的限制，而且，前置放大器应具有低输出阻抗，这样可保证电缆电容不衰减信号的高频分量。

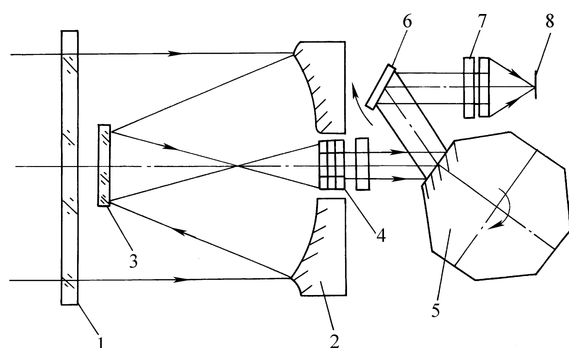



图 10-8　热成像光学系统

1—保护窗口　2—主镜　3—次镜　4—望远镜后组锗透镜　5—八面外反射行扫描转鼓　6—平面摆动帧扫描镜　7—准直透镜　8—探测器

前置放大器后的信号处理一般包括进一步的放大、带宽的限制、检波、控制及终端输出显示等。其中，最佳带宽的确定十分重要，它取决于信号和噪声二者的频谱特性。在大多数系统中，输出信号的峰值功率与带宽的平方成正比，随着带宽的增加，响应时间减小，输出信号的峰值功率很快达到某一与带宽无关的常数值；另一方面，又由于输出的噪声功率随带宽线性地增加，因而存在一个最佳带宽，这时脉冲峰值功率与噪声功率之比达到最大值。

热成像系统使用多元探测器列阵时，原则上应有与列阵元件数相等的信号通道数，但从成本、尺寸和重量考虑，这是难以实现的。一种可行的办法是使用时间分配多路传输器，近年来，新的固态开关技术的开发，已用于光电导探测器的低电平开关系统中。最近，一种更好的方法是使用电荷藕合器件（CCD）实现多路传输。红外探测器与扫描装置相关联，对目标同时取样，并注入到 CCD 移位寄存器。各 CCD 单元的电荷量正比于对应的探测器取样信号，然后由一快速时钟脉冲将 CCD 各单元中的电荷移出，经输出电路形成一组串行的与取样信号对应的视频信号。

**4. 显示方法**

热像仪的图像显示有光源显示法电视屏幕显示两种方法。

光源显示法：视频信号经放大与处理后，其输出信号直接驱动发光二极管、等离子显示板或辉光放电管等光源，使之显示出目标表面红外辐射能量分布情况。这种显示方法的优点是可以得到亮度较高的图像，但图像清晰度不甚好。

电视屏幕显示法：这种方法使用较为普遍。它是把经放大和处理的信号输入到电视显像管中，在荧光屏上便显示出目标的红外图像。对于黑白显像管，将显示出明暗不同的黑白图像，所呈现的不同灰度等级，代表着不同温度。对于彩色显像管，视频信号经分层和编码处理后，输入到管中，其荧光屏上便显示出目标的彩色图像。必须指出，这时的彩色图像并不代表目标的真实颜色，而只反映不同温度的分布，称为假彩色热像。通常用红、黄等暖色表示较高的温度，而用紫、蓝等颜色表示较低的温度。

## 10. 2. 2　红外热像仪的工作原理

以瑞曲 AGA 公司生产的 AGA 系列热像仪为例，说明热像仪的工作原理。

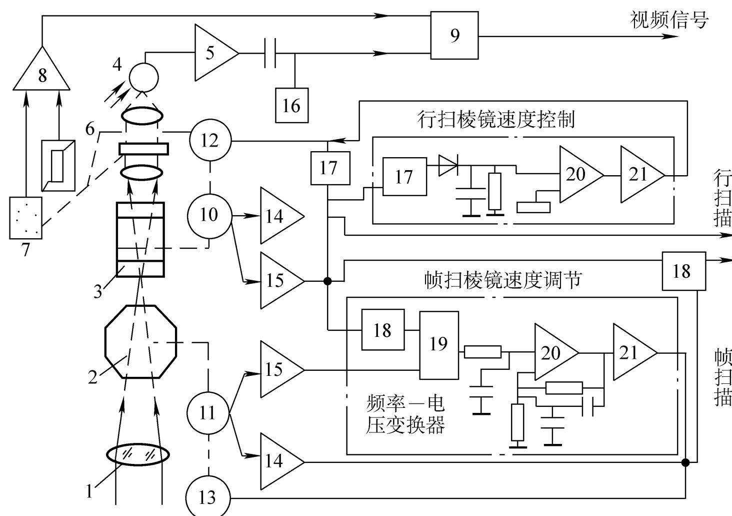



图 10-9　AGA780 型热像仪原理框图

1—物镜　2—帧扫描镜　3—行扫棱镜　4—辐射探测器　5—前置放大器　6—温度补偿热敏电阻　7—孔径及滤光片选择转换开关　8—温度补偿信号放大器　9—混频器　10—行同步磁传感器　11—帧同步磁传感器　12—行扫棱镜电动机　13—帧扫棱镜电动机　14—主放大器　15—触发放大器　16—电子开关　17—脉冲发生器　18—脉冲计数器　19—数字式相位检波器　20—比较器　21—输出放大器

AGA 热像仪是广泛应用的最有代表性的一种民用热像仪。AGA780 型热像仪的结构方框图如图 10-9 所示。AGA780 型热像仪的工作原理为：从目标来的辐射聚集到辐射探测器 4 上。长波探测装置（包含 HgCdTe 器件）使用锗光学部件，双波探测装置（包含 InSb 和 HgCdTe 器件）包含两个相连的同类扫描器。视频控制装置或者作为单独部件，或者安装在支架柜中，其中还安装有黑白显像管和热分布显示装置，后者允许再现每行或每帧的图像分布。显示屏可显示 50mm × 50mm 的图像。

为了减小因温度变化引起的探测装置的直流漂移，采用了电平籍位及漂移补偿组合电路。当棱镜处于非工作状态时，被电子开关籍位的脉冲发生器才进行工作。当对目标扫描时，产生补偿信号，于是从放大器—加法器输出的最后信号不依赖于不稳定的温度因素。

为了对各种信息进行定量处理，AGA780 型热像仪配备了多种辅助装置和插入式配件，如采样面积选择器（SAS）、热幅度分析器（TAM）、热面积分析器（TAR）、采样读出指示器（SRI）、图像数据终端（IDT），以及信息数据的数字处理和记录装置（OSCAR）等，特别是 OSCAR 可起到热像仪与电子计算机之间的接口作用。

### 10.2.3　红外热像仪的特点

热像仪是一种复杂的高技术装置，在军事上作为夜视仪器，具有如下优越性：

1）被动式。热像仪不需要配置辐射源，它完全是利用目标自身的红外辐射成像。在战争中既不易被对方发觉，也不会受到敌方干扰。

2）全天候。热像仪可以在昼夜 24h 执行任务，它可在多雾气候下观测，也可以在漆黑夜间搜索，此外，它不可以揭露伪装目标。

3）实时性。现代热像仪大都是电视兼容装置，可以获得实时可见图像。

### 10.2.4　红外热像仪的种类

红外热像仪的种类繁多，按用途分有军用热像仪和民用热像仪。

军用热像仪包括各类红外观察仪、红外热瞄具、坦克及装甲车驾驶员用的潜望式热像仪、配于火控系统和跟踪系统的热像仪、前置红外装置及红外摄像机等。民用热像仪包括各类工业用热像仪、勘查资源用热像仪、医用热像仪及科研用热像仪等。

为了反映热像仪的性能水平，还可按热像仪用探测器的类型来划分热像仪的类别，这种分类方法也反映了红外技术的不同发展阶段，它包括单元探测器热像仪、多元探测器热像仪、SPRITE 探测器热像仪及焦平面阵列探测器热像仪等。

### 10.2.5　红外热像仪的应用

**1. FLIR 系统公司 510 型手持式热像仪**

由前视红外（FLIR）系统公司研制的 510 型热像仪是一种热电致冷手持式红外摄像机（见图 10-10），主要用于寂静情况下，要求快速使用摄像机监视的夜间。

该摄像机采用焦平面阵列探测器技术，能探测 1000m 范围内地面上的人。510 型热像仪的特点是自动调节最佳图像，图像致冷、机械聚焦，电子变距自动进行。当对要求高度安全的建筑物连续监视时，该摄像机也可进行遥控操作。

宽视场透镜（18°×9°）能使操作人员快速目视拍摄宽范围的全景。当需要时，顶部还可加 1 个液晶显示取景器。

510 型红外热像仪内部有 1 个电池，用户需要记录图像时，可提供 PAL 视频输出或 NTSC 视频输出，如在法庭提供证据。

510 型红外热像仪质量小于 2kg，有 4 个控制按钮用于单手操作。

技术性能：

扫描器

| | |
|---|---|
| 探测器类型： | 160 元线阵 |
| 光谱频带： | 3～5μm |
| 探测器致冷： | 热电型（珀尔帖效应） |
| 起动时间： | 10～15s |
| 每场红外行： | 160 |
| 红外场率： | EIA：15Hz；CCIR：12.5Hz |

透镜

| | |
|---|---|
| 视场： | 18°×9° |
| 最小聚焦： | 0.7m |

图像显示

| | |
|---|---|
| 取景器： | 连续灰度级 |
| 视频输出： | 标准 EIA 或 CCIR 视场可选 |

物理特性

| | |
|---|---|
| 尺寸： | 92mm×148mm×171mm |
| 质量： | <1.6kg（含电池） |
| 电池： | 可充电 6V 镍/镉电池 |

探测范围（在 26℃环境温度条件下）

| 目标 | 探测距离 | 识别 |
|---|---|---|
| 人： | 1.0km | 0.4km |
| 战斗机： | 5.3km | 1.9km |
| 快艇： | 4.4km | 1.6km |

**2. Marconi 公司 SS600 系列 3 热像仪**

由 Marconi 公司研制的 SS600 系列 3 热像仪（见图 10-11）是一种昼夜和弱能见度条件下能工作的热像仪，传感器采用热成像组件，望远镜选用可变换倍率或固定倍率。该热像仪采用 SPRITE 探测器，用闭路循环致冷机低温致冷。该热像仪由 3 个可更换的部件（LRU）组成：传感器头、电子处理部件和控制部件。



图 10-10　FLIR 系统公司 510 型手持式热像仪

最初 SS600 系列组件研制用于与英国军队"山猫"直升机的"陶"式瞄具组合使用，并用作其他监视系统。SS600 系列热像仪正在许多安全领域和边防起作用，可用于"星闪"系统的系统制导瞄具及空地导弹系统。

SS600 热像仪可用作远程探测，许多功能采用数字信号处理，例如：噪声减少为 9dB 信噪比，电子放大，停帧，RS-422 接口，自动增益和补偿。

技术性能：

扫描器

| | |
|---|---|
| 光谱频带： | 8～12μm |
| 探测器： | 8 元 SPRITE |
| 致冷： | 闭路 |
| 扫描器视场： | 40°×25.4° |
| 电视线数： | 484 |

尺寸

| | |
|---|---|
| 传感器头: | 205mm × 225mm × 200mm（不含望远镜） |
| 电子设备: | 245mm × 200mm × 140mm |
| 质量: | 14.5kg（不含望远镜） |
| 电源: | 19 ~ 32V DC |
| 最大功耗: | 55W |

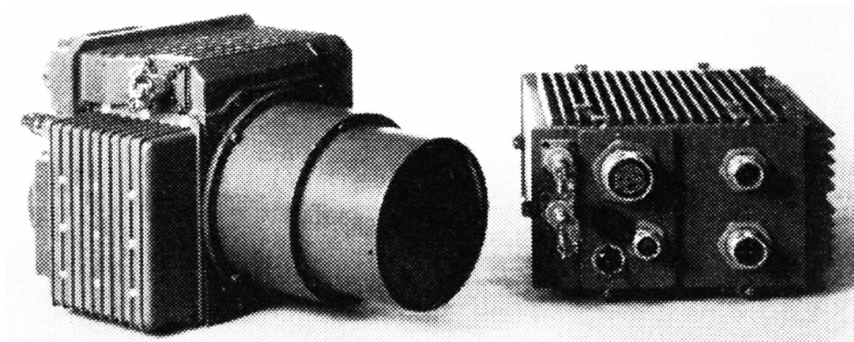


图 10-11　Marconi 公司 SS600 系列 3 热像仪

左侧：传感器头，含扫描仪和望远镜。右侧：电子处理部件　1995

## 10.3　夜视仪

人们对周围事物的认识，约有 85% 是以光线作为媒介，通过视觉而引起反应的，这说明光线对于人们观察、了解和分析事物的重要性。但是由于人类的视觉有局限性，为了扩大人们的视界，就必需利用一些器材。例如，观察远景需借助望远镜，观察细微需要显微镜，那么观察暗处的景物，就要利用夜视仪。

### 10.3.1　夜视仪的分类

夜视仪按原理来分，有主动式和被动式两种。主动夜视系统是利用非可视光作光源，它有两种工作方式：一种是区域发光器，如红外灯；另一种是采用窄光束控制扫描视场，接收反射非可视光在监视器荧光屏上同步显示图像，所以这种夜视仪也可称为光夜视仪，热成像、红外、紫外、X 射线等都属于这类。被动夜视系统是利用如月光、星光、天空辉光、夜天光、热和一切很微弱的自然光线，加以放大增强达到可视的目的。这类夜视仪也称为微光夜视仪，用于电视上称为微光摄像机。它与一般摄像机怎么划分呢？目前还没有一个精确的标准。一般用灵敏度来定义：任何摄像机，其灵敏度超过普通硫化锑光导管电视摄像机时，均称为低照度摄像机或微光摄像机。

另外，在低照度情况下，用人眼直接观察的叫夜视镜，利用监视器进行观察的叫微光摄像机，微光摄像机还有彩色和黑白之分。

### 10.3.2　夜视仪的工作原理

人眼能直接观察到景物的必要条件是有光线，但这并不充分。充分条件是必须有

一定的环境照度和可见光。夜视技术就是围绕解决这两个问题来做文章的。

光也是一种电磁波，它是一种频率很高、波长很小的电磁波。它的波长一般在 $10\sim10^6$nm之间，而可见光仅占其中的一小部分，约在 390～776nm 之间。390nm 以下为紫外线，776nm 以上为红外线。

使不可见光转为可见光，将低照度提高需要从光的一种特性说起。19 世纪爱尔兰人史密斯发现了一种光电效应，这就使光和电互相转换成为可能。在科学技术高度发展的今天，将电信号进行变频、变相和放大，只要把景物各部分明暗不同的亮度转变成大小不同的电信号（电流和电压），然后通过扫描技术，将光图像转变为电图像，这个过程就称为摄像。最后利用显像技术将电图像还原为光图像，以达到观察的目的。



图 10-12　红外夜视仪

以红外夜视仪为例（见图 10-12），使用红外灯照在目标上，因为红外光是不可视光，可以不暴露自己，然后通过红外变像管将不可视的电像转变成人眼可见的光学像，达到观察的目的。热成像是利用目标与周围环境之间由于温度或发射率的差异所产生的热对比度进行成像。由于热对比度的差异而把红外辐射能量密度分布图显示出来，成为热像，再通过热像将红外图像变为可见光图像。

微光夜视仪是将微弱的自然光图像通过像增强器转变为增强了百倍甚至几万倍的电子图像，再将增强的电子图像转变成为可视的光学图像。

## 10.3.3　夜视仪的应用实例

### 1. 美国 AN/PVS-5A 微光夜视眼镜

由美国瓦洛公司研制的 AN/PVS-5A 微光夜视眼镜（见图 10-13），可用于夜间驾驶车辆、巡逻、警戒、探测红外光源、驾驶低空直升机等，配上红外光源后还可用于看地面及维修仪器等。该夜视眼镜观察图像清晰，易于佩戴在驾驶员或飞行员的头盔上，现已在美国陆军大量装备。它可在 200m 内发现人，在 136m 内识别人，在 565m 内发现坦克，在 395m 内识别坦克。



图 10-13　美国 AN/PVS-5A 微光夜视眼镜

### 2. 美国 AN/TVS-5 多人武器瞄准镜

由美国瓦洛公司研制的 AN/TVS-5 多人武器瞄准镜（见图 10-14），可安装在各种多人武器上进行夜间瞄准，并可安装在三脚架上进行夜间观察。该瞄准镜配有可调节的内部分划板

照明器和可互换的分划板图案，所以各种武器在不移动瞄准镜的情况下就能进行瞄准。瞄准镜可探测到 1310m 处的人员，在 990m 内识别人员，在 2664m 处探测到坦克，在 1903m 内识别坦克。



图 10-14　美国 AN/TVS-5 多人武器瞄准镜

### 3. 英国“鹰”远距离手持微光夜视仪

由英国 Pilkington 公司于 1984 年研制、生产的“鹰”远距离手持微光夜视仪（见图 10-15），可手持或安装在低三脚架上进行远距离夜间监视和观察，也可与激光测距机、火炬火控系统配用，且可在各种战场条件下使用。夜视仪配有折反物镜、双目镜和武器瞄准与火力校正用的亮十字分划。质量不超过 4kg，采用第二代和第三代像增强管时分别可在 1km 和 1.4km 内识别主战坦克。



图 10-15　英国“鹰”远距离手持微光夜视仪

## 10.4　多传感器稳定集成系统

图 10-16 所示的多传感器稳定集成系统（MSIS）是在 20 世纪 80 年代末研制的，

作为光电系统以满足以色列海军在各种舰船上进行被动监视和火控的要求。1988 年签订了生产合同，大约在 1990 年系统安装在“Dabur”级巡逻艇和“超德沃拉”级快速攻击艇上。为了评估的目的，在 1990 ~ 1991 年海湾战争期间，该系统安装在“奥利弗 · 哈泽德 · 佩里”级护卫舰 USS 哈利伯顿号（FFG 40）上，也安装在了“埃拉特”级（萨尔 5）巡洋舰和海兹号（萨尔 4.5）导弹快速攻击艇上。该系统已被出口，并与洛克希德 · 马丁公司的战术防御系统结合销售。

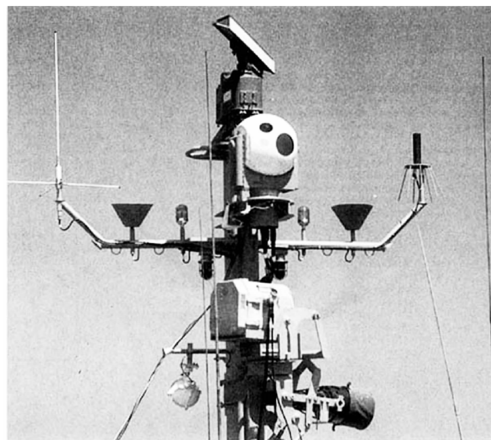


图 10-16　多传感器稳定集成系统

**1. 技术特点**

多传感器稳定集成系统用于安装在舰船上，提供目标探测、识别、搜索分辨和跟踪。它也将提供对口径可达 76mm 火炮的火控。MSIS 包括 FLIR、电视摄像机和激光测距仪/指示器，提供全天候昼夜使用的多传感器性能。该传感器将探测识别和跟踪各类水面目标，从大型油船到小橡胶艇，以及所有型号的直升机、固定翼飞机和掠海导弹。

多传感器稳定集成系统的特点是具有一个四轴万向架平台，并提供广角的瞄准范围，与高水平的稳定装置结合。该设备具有较高的灵活性，能用于与多种舰载搜索和火控系统连接，并且重量轻、体积小。用于典型巡逻艇的 MSIS 结构仅重 100kg，其包括：

1）稳定的球形回转装置质量为 60kg，并包括热像仪、电视摄像机和激光测距仪。

2）电子控制和电源装置。

3）具有两个监视器的操作控制台。

4）盒式录像机用于自动记录。

5）电源转换器。

**2. 列装情况**

多传感器稳定集成系统应用在以色列海军海兹号（萨尔 4.5）导弹快速攻击艇、埃拉特号（萨尔 5）护卫舰和“超 · 德沃拉”级快速攻击艇（火炮）上，也应用在以色列海军航空 SA 366G Dauphin 舰载飞机上。大约 50 套 MSIS 系统被订购或交付给以色列海军和未知的国外用户。

**3. 技术指标**

| | |
|---|---|
| 定瞄准线： | 20μrad |
| 俯仰运动： | $-35° \sim 85°$ |
| 方位运动： | $n \times 360°$ |
| 旋转速度： | 60°/s 和 90°/s |
| 报告精度： | 海况为 3 级时，0.8mrad |
| 跟踪精度： | 优于 150μrad |

| | |
|---|---|
| 质量： | 回转装置 60kg，整个系统 100kg |
| 回转装置尺寸： | 780mm（高）×600mm（直径） |
| 热像仪 | |
| 波段： | 8 ~ 12μm |
| 视场： | 1°、2°、7°、24.5° |
| 探测器距离： | 对快速攻击艇 17km；对飞机 8km（大气能见度 18km） |
| 识别距离： | 对快速攻击艇 11km；对飞机 8km（大气能见度 23km） |
| 激光测距仪 | |
| 波长： | 1.064μm |
| 光束发散度： | 0.4mrad |
| 距离分辨率： | ±5m |
| 脉冲重复率： | 1 ~ 20pps |
| 电视摄像机 | |
| 类型： | CCD |
| 视场： | 1°、5° |
| 探测距离： | 对快速攻击艇 14km；对飞机 17km（大气能见度 23km） |
| 识别距离： | 对快速攻击艇 10km；对飞机 6km（大气能见度 23km） |

## 10.5　Sea Star SAFIRE 吊舱

Sea Star SAFIRE 吊舱是美国 FLIR Systems 公司的高性能通用的 SAFIRE 红外成像系统系列中最新的型号，具有作用距离远、昼夜工作的特点，能在阴暗和恶劣的气候条件下工作。Sea Star SAFIRE 通过一个先进的 3 ~ 5μm InSb 焦平面阵列成像，具有 3 个视场，一个 18∶1 变焦 CCD TV，装在一个 5 轴陀螺稳定的常平架上。

Sea Star SAFIRE（见图 10-17）采用了模块化设计，其上可以安装的有效任务载荷传感器包括激光测距仪、昼光电视、探测仪和激光照射器。另外还可以装上红外/激光指示器。

Sea Star SAFIRE 适用于舰载和机载应用，可以直接装上卸下。作为一种完全便携式的系统，Sea Star SAFIRE 能安装到多种不同的平台上，并能在一小时内完成安装和拆卸。为了满足不同的应用要求，Sea Star SAFIRE 可以朝上、朝下和侧向安装到应用平台上。

Sea Star SAFIRE 在北大西洋寒冷恶劣的条件下和在热带地区高热潮湿的条件下性能没有区别。运用于海上环境时，对这种基于 AN/AAQ-22 的系统进行水密处理，涂敷防腐蚀涂层，在塔台内部加加热器及除冰装置等。Sea Star SAFIRE 还具有易于升级的特点，不需重新购买新系统。

**1. 应用范围**

- 海上巡逻
- 导航与态势告警
- 搜索与援救
- 防止相撞

· 探雷　　　　　　　　· 反恐怖
· 反水面战（ASUW）　　· 禁毒
· 反潜战（ASW）　　　· 环境监测
· 火控　　　　　　　　· 船只交通监测

**2. 系统性能规格**

塔台尺寸：44.58cm（高）×38.35cm（直径）
塔台质量：96 磅（包括激光器和 CCD-TV 在内）
方位/俯仰覆盖范围：360°连续/+30°～−120°
回转速率：可变，≤60°/s
控制：HCU，串行数字或 MIL-STD-1553
环境：MIL-STD-810 和 MIL-STD-461

**3. 热像仪**

传感器：320×240 InSb FPA 3～5μm 响应
分辨率：640×480（微扫）
视场：窄 0.8°×0.6°
中 4.0°×3.0°
宽 25.0°×18.8°
可选宽视场：33.3°×25°
致冷：斯特林线性致冷器
视频输出：RS-170 或 CCIR

**4. 可选有效任务载荷**

CCD-TV
视频格式：NTSC 或 PAL
透镜/视场：18×连续变焦/30°～1.4°

**5. 激光测距仪**

型号/分类：铒玻璃（1.54mm）/第一类（眼睛安全）
束散角/距离精度：<1mrad/±5m
达到合格精度的最大距离：10km（可以显示 20km）

**6. 激光照射器**（NVG 兼容）

发射波长：820～850nm
类型：Ⅲb 类

**7. 探测仪**

视频：NTSC 或 PAL
FOV/色度：0.4°H×0.3°V/彩色或黑白

**8. 可选装置**

自动跟踪器，雷达，导航和 VCR 接口，快速拆卸座，Nightsun™接口，平板显示，移动地图显示，640×480 InSb/QWIP，激光指示器。

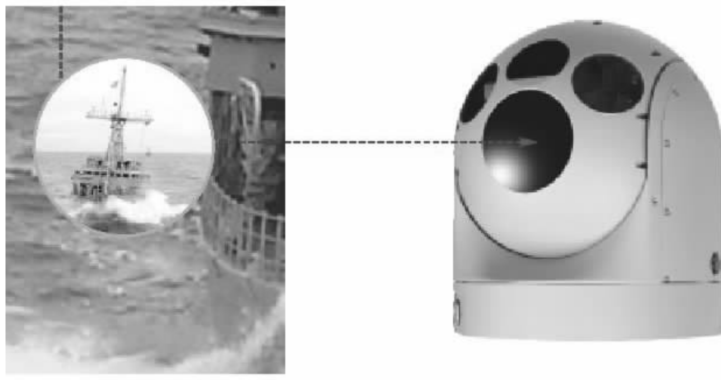


图 10-17　Sea Star SAFIRE 吊舱

## 10.6　Brite Star 激光指示器

Brite Star 激光指示器/测距仪、热成像和可见光成像系统专用于机载和舰载平台。装有 FLIR Systems 公司的高分辨率 3 ~ 5μm InSb 焦平面阵列红外热像仪、高分辨率 CCD TV 摄像机和激光指示器/测距仪，能完成各种成像和目标探测任务。

Brite Star 的激光指示器（见图 10-18）与所有的 Band I 和三军的 PRF 和 PIM 码兼容，可以为装有 Brite Star 的平台提供指示，也可以为远距离的平台提供目标指示。切换到激光测距方式后，眼睛安全的激光器就可以提供精确的目标距离信息。

Brite Star 具有自动瞄准能力，其瞄准模块能自动使热像仪和 TV 传感器对准激光斑的中心，该功能是全自动完成的，触摸一个按钮就可以完成。

**1. 应用范围**

| | |
|---|---|
| · 海上巡逻 | · 火控 |
| · 目标探测 | · 导航和态势报警 |
| · 搜索与援救 | · 无人机 |
| · 反水面战（ASUW） | · 监视 |
| · 反潜战（ASW） | · 侦察 |

**2. 系统技术规格**

| | |
|---|---|
| 塔台尺寸： | 22.86cm × 30.48cm |
| 塔台质量： | 51.2kg |
| 稳定： | 4 轴 |
| 方位范围： | 360° |
| 俯仰范围： | 32° ~ －100° |
| 控制： | HCU，串行数字 |
| 环境： | MIL-STD-810E 和 MIL-STD-461D A1B 类 |

**3. 热像仪**

| | |
|---|---|
| 探测器： | InSb FPA 3 ~ 5μm |
| 像素密度： | 320 × 240 |
| 传感器分辨率： | 640 × 480 |
| 视场： | 窄 0.8° × 0.6° |
| | 中 3.3° × 2.5° |
| | 宽 25.5° × 19.1° |

**4. 激光指示器/激光测距仪**

| | |
|---|---|
| 指示器类型： | Nd-YAG, 1.06μm |
| 类型： | 类型 4 |
| 激光测距仪类型： | 1.57μm，第一类（眼睛安全） |

**5. CCD 传感器**

| | |
|---|---|
| 摄像机： | 黑白 |
| 视场： | 窄 0.8° × 0.6° |
| | 中 3.3° × 2.5° |
| | 宽 25.5° × 19.1° |

**6. 分辨率**　　768 × 494

**7. 其他性能**

自动跟踪器；瞄准模块；可倒置塔台；MIL-STD-1553B 接口；RS-232/422 接口；ARINC 接口。

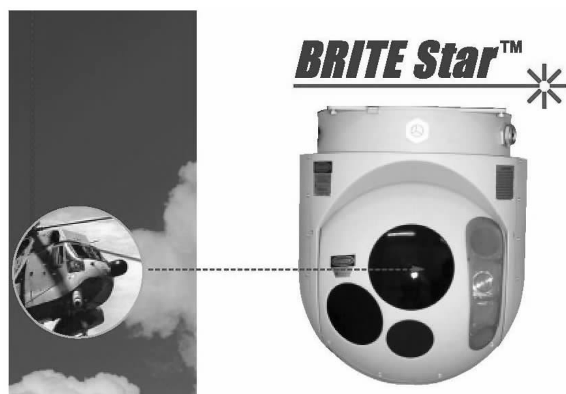



图 10-18　Brite Star 激光指示器

## 10.7　SeaFLIR 光电吊舱

SeaFLIR（图 10-19）能在海上工作，装有功能强大的陀螺稳定热像仪和远距离彩色 CCD 摄像机。SeaFLIR 是一种加固紧凑型组件，海上应用和空中应用的性能相同，提供远距离红外探测和彩色可见光探测能力。

SeaFLIR 结构紧凑，总质量仅 29lb（13.15kg），常平架直径仅 9in（22.86cm），这

种轻质量和小尺寸降低了结构载荷，提高了平台的稳定性，因此，SeaFLIR 适合装于所有的水面舰船和飞机上，具有很好的成像能力。

SeaFLIR 可以工作在一个安全的隐蔽距离，并能在各种阴影甚至夜晚条件下清晰地观察到水天线。系统使用的是 3 ~ 5μm InSb 焦平面阵列，彩色 CCD 具有 10∶1 连续变焦能力，在昼光条件下具有很好的观察能力，还能在多尘的条件下工作。

SeaFLIR 能在 5 级海况下工作并能承受 $50G$ 的冲击。按照军标 MIL-STD-461 和 801E 进行实地试验后证明，系统具有的防水密封、加固部件、特殊的耐腐蚀涂层及内部加热装置都使系统满足了海上应用的要求。SeaFLIR 系统已在美国海军和美国海岸陆战队得到应用。

SeaFLIR 的标准特征是具有人机工程学手动控制器、三种模式跟踪和自动扫描。另外，SeaFLIR 的连续 360°旋转包括了对天顶的自动成像能力。系统还能与一些其他的设备连接，如雷达、GPS 及火控系统等。

**1. 应用范围**

| | |
|---|---|
| · 海岸与港口巡逻 | · 防撞 |
| · 海上巡逻 | · 反恐怖 |
| · 搜索与援救 | · 侦察与监视 |
| · 探雷 | · 禁毒 |
| · 反水面战 | · 环境监测 |
| · 导航与态势告警 | · 船只交通管理 |

**2. 系统技术规格**

| | |
|---|---|
| 塔台尺寸： | 22.9cm（直径）×38.6cm（高） |
| 塔台质量： | 13.1kg |
| 方位覆盖： | 360°连续 |
| 俯仰覆盖： | 360°连续 |
| 回转速度： | 可变，≤50°/s |
| 控制： | HCU，串行数字 |
| 环境： | MIL-STD-810E，MIL-STD-461C |
| 海上应用： | 密封壳体，HCU 和 ECU，塔台加热 |

**3. 热像仪**

| | |
|---|---|
| 传感器： | 256×256 InSb FPA 3 ~ 5μm |
| 分辨率： | 1.2 至 0.12mrad |
| 视场： | 水平 17.6° ~ 1.76° |
| 焦距： | 25 ~ 250mm 连续变焦 |

**4. 昼光成像**

| | |
|---|---|
| 视频格式： | NTSC 或 PAL |
| 成像仪： | 1/3″CCD 811×608 |
| 分辨率： | 470 电视行 |
| 视场 | 22° ~ 2.2°水平，连续变焦 |

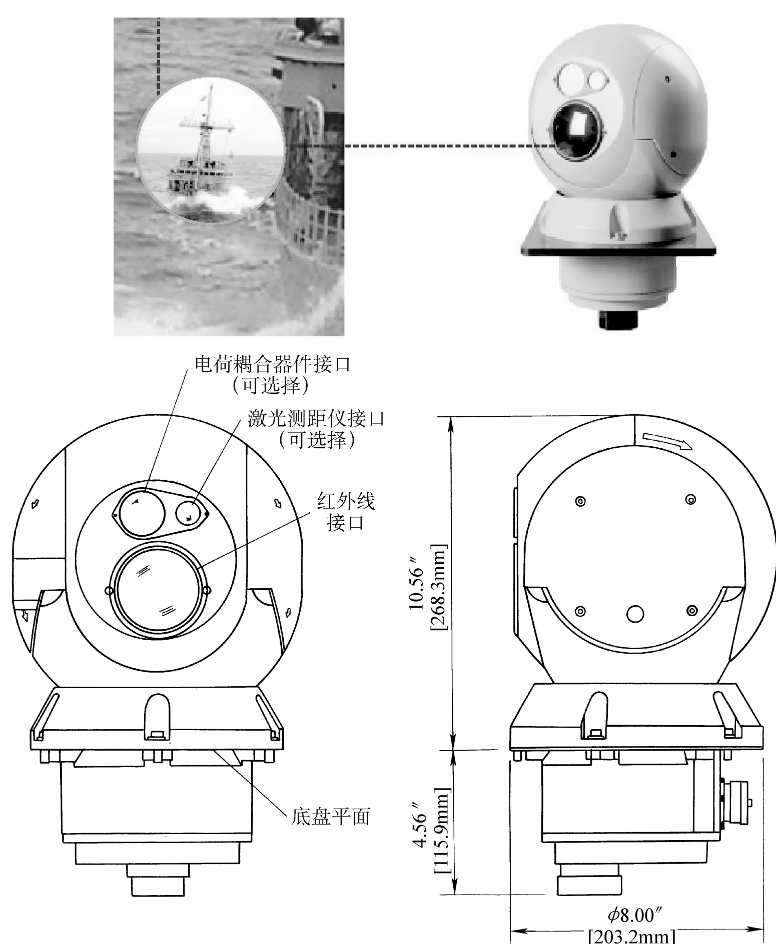



图 10-19　SeaFLIR 光电吊舱

## 10.8　法国 DCN 国际公司的舰用火控系统 DCN OP3A/SARA

20 世纪 80 年代末期，法国海军在一项名为反导自防御改进（AAA）的计划下，开始为其主要的战舰研制自卫系统。系统的基础是光学和光电传感器和近程武器，在 20 世纪 90 年代初期确定了技术要求。

系统重新命名为反导自防御改进计划（OP3A），从 1993 年 11 月订购硬件，首先订购的是通用机械电气公司的 VIGY 105。该系统被“乔治·格莱”级驱逐舰、“拉斐特”级护卫舰、船坞登陆舰、水下补给油船和航空母舰福煦号选用。第一套系统安装在驱逐舰让·德·维埃纳号上。

OP3A 作为对空来袭目标自防御系统（SARA），由 DCN 国际公司生产，如图 10-20 所示。

**1. 技术特点**

OP3A 包括一个火控台、光电传感器，以及“硬”、“软”杀伤单元。一些舰船只接收该系统的部分单元。

火控台将安装在舰桥上，在舰桥上要有一个天窗，以利用可升降的座椅给指挥员提供周视视场。该座椅将配有控制器，控制器将优先给坐在后面的控制防卫信息处理系统（STIDAV）的自卫军官发出威胁的信号。这些都基于两个 Calisto 控制台及为塞尼特 8 研制的软件的实时处理器。

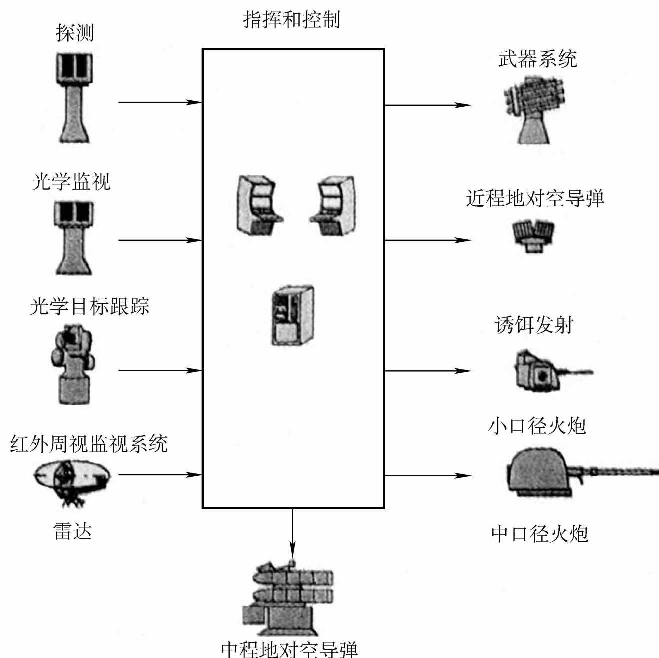



图 10-20　SARA 系统图

一些舰船配备了通用机械电气公司的旺皮尔 MB 红外监视系统，但是对于目标指示和火控目的，大多数舰船将配有两套 VIGY 105 光电系统。在一些舰船和舰级上，这些系统将由 SAGEM TDS 90 取代。这就是具有 SAGEM SAS 90 瞄准具的英国 MSI-防御目标指示观察装置。

方位范围是 340°弧度，俯仰范围是 −20° ~ 65°。目标指示精度是 3mrad。传感器是反射式瞄准具或 SAGEM ALIS 8 ~ 12μm 热像仪。

“硬”杀伤单元包括 Matra Mistral 要地防御防空导弹和 30mm 火炮。Mistral 是萨德拉尔遥控发射器型，并且舰船将携带两枚该导弹，尽管一些舰船将保留它们的 SIMBAD 发射器。火炮将由 ECN Ruelle 公司生产，是按照许可生产的 MK 30 紧凑型。“软杀伤”单元将包括新的达索电子公司的电子干扰系统和由 AMBL-1C 型号改进的 CS 防御公司达盖诱饵系统。

**2. 列装情况**

在生产中，22 艘法国舰船会在不同程度上计划接收 OP3A 系统。1996 年 5 月，OP3A 系统在驱逐舰让·德·维埃纳号上投入使用，第一套旺皮尔 MB 在 1997 年 5 月安装在上述驱逐舰上。该计划于 1998 年完成。

## 10.9 荷兰信号公司的光电火控系统

LIROD（轻型雷达光电子指向器）是和 LIOD 光电火控系统一起研制的。LIROD 偏向于雷达跟踪而不是光电跟踪。LIROD Mk 2 作为改进型从 1993 年开始销售。这一型号第一次出口销售给印度尼西亚，用于“PB 57” Nav V 巡逻艇。

### 1. 技术特点

LIROD 在所有的型号中都是基于 K-波段跟踪雷达和电视摄像机的轻型火控系统。它用于同时控制不同的平高两用炮并跟踪一个空中目标或一个水面目标。它既可以单独使用，也可以用来补充信号公司系列的火控系统。LIROD Mk 2 被认为足以对付低空掠海导弹。



图 10-21　最新型的轻质量雷达/光电指向器（LIROD Mk2）

LIROD Mk 2 配有具有行波管发射机的新型雷达和具有单脉冲束的椭圆抛物面天线。天线有 1m 高，0.40m 宽，安装在质量为 475kg 的指向器上。该天线的横向转动距离为 1.60m，纵向转动距离为 1.96 m。雷达具有水平极化，并在 35GHz 的频率下工作。LIROD Mk 2 附加的特点：杀伤评估支持、扇形搜索、自动传感器选择（电视/雷达）、预先作用校准、脱靶距离指示（测量不同型号火炮炮弹的）、高水平的抗电子干扰性能、在数据提取中使用现代 FFT 处理与特殊跟踪滤波器结合以提高对低飞目标的性能。仅有的光电传感器是电视摄像机，它提供的视频制式是 CCIR 标准（625 线、25 帧/s、2∶1 接口），用于观察和与雷达角跟踪平行的角跟踪，还用于与雷达范围跟踪结合的火控，建立三维解法。发展潜力：红外摄像机和激光。生产厂商声称 Mk 2 能够用雷达跟踪 20km 处的战斗机大小的目标，用光电跟踪 10km 处的战斗机大小的目标。图 10-21 为 LIROD Mk2 信号公司最新型的轻质量雷达/光电指向器（LIROD）。

### 2. 列装情况

大约有 40 套 LIROD Mk 1 系统交付使用或已被下列海军订购，它们是阿根廷、加拿大、印度尼西亚和泰国海军。LIROD Mk 2 是现在的生产配置。

### 3. 技术指标

指向器 Mk 2

| | |
|---|---|
| 旋转: | 360°/s |
| 俯仰: | $-30° \sim +85°$ |
| 方位速度: | 120°/s |
| 俯仰速度: | 80°/s |
| 雷达: | K-波段 |

电视摄像机

| | |
|---|---|
| 类型: | 昼光可变 FOV |
| 视场: | 2°~20°（对角线） |
| 功率: | 115V 60Hz（3kVA）; 440V 60Hz（1.0 kVA） |

质量

| | |
|---|---|
| Mk 2: | 625 kg（子系统） |

## 10.10　红外搜索和跟踪系统

国外红外跟踪与搜索的装备有很多，主要有法国的 Matra Defense 和 SAGEM 公司的 SAMIR（DDM），美国 Cincinnati 公司的 AN/AAR-44，法国 SAT 和 SAGEM 公司的 VAMPIR MB，荷兰 Signal 公司的 SIRIUS（天狼星）等。

### 1. SAGEM 公司的旺皮尔系统

在 20 世纪 70 年代中期，法国海军建造技术局（DTCN）开始研究替换雷达用来探测反舰导弹的系统。很多光电项目被采用，其目的是提供可靠的、周视、低空探测，甚至在雷达静默阶段。这样就产生了“旺皮尔”系统（舰用防空周视红外系统），并已经结束了生产状态。当驱逐舰卡萨尔号在 1988 年 7 月编入现役时，“旺皮尔”系统作为 DIBV-1A 投入使用。

早期的“旺皮尔”系统完全用于监视，但是从 1982 年起，DTCN 开始研制用于武器控制的红外搜索和跟踪（IRST）系统。现在第二代 IRST 旺皮尔 MB 系统已经研制出来，并作为 DIBV-2A 投入使用，如图 10-22 所示。

旺皮尔 MB 系统是 OP3A（反导自防御改进计划）的一部分。法国海军舰船自卫系统（SSDS）已经安装在“乔治·莱格”级之一的驱逐舰让·德·维埃纳号上了。

（1）技术特点　旺皮尔 MB 系统是提供周视监视的 IRST 系统。它用于探测、识别和指示空中和水面目标，并同时提供辅助导航性能。它包括直径为 550mm，高为 1.50m 的旋转传感器头及显示系统。传感器头位于固定的传感器模块（包括信号处理装置、伺服控制和电源装置）上，它能够同时跟踪高达 50 个目标。据说，该系统还能够在 27km（14.5 海里）的距离上探测导弹，在 25km（16 海里）距离上探测战斗型飞机。

传感器头的孔径为 20cm，双轴陀螺稳定平面镜反射辐射到两个固定的平面镜上，接着通过二色分光镜到传感器模块上的光电子系统。红外系统包括在 3~5μm 和 8~

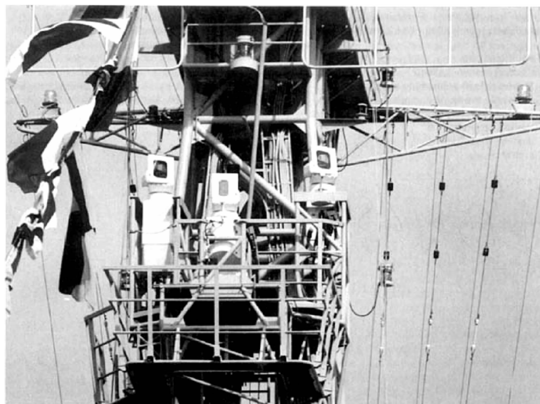


图 10-22　ASW 护卫舰让 · 德 · 维埃纳号桅杆上的旺皮尔 MB（中间）以及两个 VIGY 105 光电指向器

12μm 波段工作的第二代红外电荷耦合器件（IRCCD）焦平面阵列（288×4）。传感器提供 360°的方位作用范围，在仰角方向提供了 5°的瞬时视场。系统的俯仰作用范围是 -20° ~ +45°。

数据呈带状制式出现在显示荧光屏上，根据三带每波段显示景物和用于潜在威胁接近的 300 m 性能。字母数字数据用于目标信息以及显示舰船方位信息。

旺皮尔 MB 系统通常在遥控方式下工作，监视和目标指示信息通过舰船作战系统自动地传递到武器系统。低效独立方式用于把数据直接传送到武器系统。

（2）列装情况　完成了两套旺皮尔系统的生产，同时旺皮尔 MB 系统的生产仍在进行中。法国约订购了 7 套旺皮尔 MB 系统。旺皮尔 MB 系统现在装在“乔治 · 莱格”级 ASW 护卫舰上使用，它也装在法国海军夏尔 · 戴高尔号航空母舰上。

（3）技术指标

旺皮尔 MB

| | |
|---|---|
| 探测器类型： | 第二代 IRCCD 焦平面阵列（288×4） |
| 波段： | 3 ~ 5μm 和 8 ~ 12μm |
| 瞬时视场： | 5°（俯仰） |
| 方位作用范围： | 360° |
| 旋转速度： | 1.4 r/s |
| 俯仰作用范围： | -20° ~ +45° |
| 提供的跟踪精度： | 最大 0.5mrad |
| 虚警率： | <1/h（典型） |
| 同时跟踪的目标数： | 50 个 |
| 致冷： | 闭环斯特林 |
| 回转装置的质量： | 180kg |
| 功率： | 115V，60 和 400Hz |

典型探测距离

亚音速导弹：　9 ~ 16km

超音速导弹：　14 ~ 27km

战斗机：　10 ~ 25km

直升机：　7 ~ 10km

**2. 荷兰信号公司　斯帕航天航空公司 SIRIUS**（天狼星）

在 1993 年底，根据 IRSCAN 技术，荷兰信号公司开始研制远程红外搜索和跟踪（IRST）系统——SIRIUS。1993 年 12 月 22 日，荷兰皇家海军与荷兰信号公司签订了合同，研制和生产两套试制系统。德国、荷兰和西班牙海军 124 型和西班牙海军 F100 级防空护卫舰计划预定 SIRIUS 系统。1994 年初，由于加拿大对该项目的兴趣，从而促成了两个国家对 SIRIUS 系统的共同研制。

（1）技术特点　SIRIUS 系统是远程红外监视和跟踪系统（LR-IRST），用于加强对水面舰艇的水平搜索性能以防御掠海反舰导弹。SIRIUS 系统在任何情况下，不仅在地区防御中而且在要点防御演习方案中使用都能达到最佳的性能。它能够与任何作战系统结合，也能与任何传感器系统密切配合，例如从简单的跟踪雷达或自动近程武器系统到主动相控阵雷达。图 10-23 为 SIRIUS 双波段红外搜索和跟踪系统的隐身传感器罩。



图 10-23　SIRIUS 双波段红外搜索和跟踪系统的隐身传感器罩

一探测到目标，目标就被跟踪，然后获得证实的跟踪数据信息，供作战系统使用。进一步的跟踪和目标分类产生了警报，换言之属于威胁目标的目标跟踪信息被武器系统直接使用，它是一种完全三轴稳定双红外波段系统。

SIRIUS 系统预定与改进的“海雀”导弹系统一起工作，并且以被证实的 IRSCAN 技术为基础。它增加了第二个探测器头，用来提供双波段的作用范围和提高红外信号处理及信号判读算法，并且以 60r/min 的速度旋转。SIRIUS 回到原始的 IRSCAN 原理，对完全稳定头部增加了 3 ~ 5μm 摄像机和 8 ~ 12μm 摄像机。探测器提供了具有时间延迟积分的 300 × 10 元和 300 × 8 元的阵列，也包括互补 CMOS 读出技术。在传感器头内使用了 16 位模拟/数字转换。使用信号公司的闭环斯特林机可以把温度冷却到 -196℃。系统的可达探测距离大约是 30km（16 海里）。

（2）列装情况　在研制中。计划 1998 年初生产出试制样机，1999 年海试。

（3）技术指标

探测距离（典型）

超音速掠海导弹：　35km

亚音速掠海导弹：　21km

战斗机：　30km

| | |
|---|---|
| 仰角范围： | 3.8° |
| 扫描速度： | >60r/min |
| 波段： | 3～5μm，8～12μm |
| 探测器： | 300×10 元，300×8 元 |
| 致冷： | 闭环斯特林 |
| 稳定传感器头部质量： | 180kg |
| 甲板下设备质量： | 830kg |
| 功耗： | 8kW |

# 参 考 文 献


［1］ 郑光昭．光信息科学与技术应用［M］．北京：电子工业出版社，2002.
［2］ 刘继芳．光电子技术［M］．北京：电子工业出版社，2002.
［3］ 龚炳铮．机电一体化应用实例［M］．北京：机械工业出版社，1994.
［4］ 林宋，田建君．现代数控机床［M］．北京：化学工业出版社，2003.
［5］ 王家金．激光加工技术［M］．北京：中国计量出版社，1992.
［6］ 石顺祥，过已吉．光电子技术及其应用［M］．成都：电子科技大学出版社，1994.
［7］ 梅遂生．光电子技术——信息装备的新秀［M］．北京：国防工业出版社，1999.
［8］ 林宋，刘杰生，殷际英，等．光机电一体化技术产品实例［M］．北京：化学工业出版社，2003.
［9］ 王永仲．现化军用光学技术［M］．北京：科学出版社，2003.
［10］ 徐之海，李奇．现代成像系统［M］．北京：国防工业出版社，2001.
［11］ 吴宗凡．红外与微光技术［M］．北京：国防工业出版社，1998.
［12］ 雷仁湛．创造奇迹的光——21世纪的激光技术［M］．北京：科学技术文献出版社，1995.
［13］ 陈昌巨，刘家良，刘晓军．汽车ABS的控制方法研究［J］．武汉理工大学学报，2003（1）：71-74.
［14］ 吴昌扣，孙骏．汽车ABS技术及发展趋势［J］．安徽科技，2003（5）：41-42.
［15］ 刘朝红，韩进．汽车ABS的应用及发展方向［J］．本溪冶金高等专科学校学报，2002，4（2）：4-6.
［16］ 魏宏玲，黄德中．基于汽车ABS试验台架的传感器技术［J］．机电工程，2001，18（5）：125-126.
［17］ 孙连成．汽车安全新技术——“ABS”制动系统［J］．辽宁交通科技，1997，20（1）：46-47.
［18］ 关可，林薇．GPS在汽车交通管理中的应用［J］．西安公路交通大学学报，1999，19（1）：92-94.
［19］ 吴凯，何伯良．GPS技术在交通及水利中的应用研讨［J］．河海大学常州分校学报，2001，15（1）：24-28.
［20］ 张红，龚晓峰．GIS和GPS在交通中的应用［J］．微型电脑应用，2001，17（4）：1-4.
［21］ 张伟宏．GPS系统在交通领域中的应用及展望在交通领域中的应用及展望［J］．智能交通，2003：50-51.
［22］ 张伟宏，胡劲松，王力强．GPS系统在交通领域中的应用及展望［J］．黑龙江交通科技，2003（2）：61-62.
［23］ 张宝峰，等．GPS在交通道路测量中的应用［J］．计量学报，2002，23（2）：98-100.
［24］ 杨大凯，王剑，蔡柏根．GPS及GIS在智能交通监控系统中的应用［J］．交通科技，2002（2）：53-56.

［25］ 李筱菁，等．GPS 技术在城市交通状况实时检测技术中的应用［J］．青岛海洋大学学报，2002，32（3）：475-481.
［26］ 王光庆，王士磊．浅谈变频空调器的测试技术［J］．家用电器科技，1999：22-23.
［27］ 王沣浩，等．变频空调器控制系统的技术现状与发展趋势［J］．制冷学报，2002（2）：1-5.
［28］ 周鲜成．模糊控制技术在变频空调器中的应用［J］．电子技术应用，2001（2）：17-22.
［29］ 李郴秀．变频空调器的特点及分类［J］．家电季风，2002（3）：40-41.
［30］ 苗海亮，等．变频空调中功率因数校正的控制电路设计［J］．上海大学学报（自然科学版），2003，9（3）：127-130.
［31］ 雷菊珍，欧益宝．电动刀架实现等分分度的应用实例［J］．机械，2003，30（1）：77-78.
［32］ 张洪兴，等，新型免抬式电动刀架的研究［J］．南昌航空工业学院学报，1999，13（3）：77-80.
［33］ 郭永丰，赵万生，耿春明．电火花加工最新技术进展［J］．航空制造技术，2003（1）：43-46.
［34］ 沈洪．微米型腔加工和高质量高速切割—2002 电火花加工技术的新动向［J］．制造技术与机床，2003（3）：7-11.
［35］ 員敏，于源，王小椿．整体涡轮盘电火花加工电极设计及运动研究［J］．西安石油学院学报（自然科学版），2003，18（1）：54-57.
［36］ 齐文春，黄莺，杨卫平．转向直拉杆锻模型腔的电火花加工［J］．模具工业，2003（4）：51-54.
［37］ 寇作炎．铝活塞铸造底模工作表面的电火花加工［J］．内燃机配件，2003（2）：45-48.
［38］ 黄毅，丁小瑜，孙昌树．展成式精密电火花加工机床［J］．电加工与模具，2002（3）：50-53.
［39］ 李文卓，赵万生．新型多功能微细电火花加工机床及应用［J］．机械加工与自动化，2001（8）：16-17.
［40］ 王振龙，赵万生，李文卓．电火花加工技术的发展趋势与工艺进展［J］．制造技术与机床，2001（7）：9-11.
［41］ 任福君，李小海．电火花加工技术的新发展［J］．佳木斯大学学报，2003，21（1）：33-37.
［42］ 沈健，朱树敏，陈远龙．锻模电解加工新技术［J］．电加工，1998（1）：9-12.
［43］ 王建业．电解加工技术的新发展［J］．电加工，1998（2）：37-41.
［44］ 徐家文，王建业，田继安．21 世纪初电解加工的发展和应用［J］．电加工与模具，2001（6）：1-5.
［45］ 周毅钧，李树新．脉冲电解加工工艺参数对粗糙度影响的研究［J］．淮南工业学院学报，2002，22（1）：29-31.
［46］ 钱密，徐家文．展成电解加工整体叶轮中的光整加工［J］．航空技术，2003（4）：47-49.
［47］ 朱荻．国外电解加工的研究进展［J］．电加工与模具，2001（1）：11-15.
［48］ 孙勇，等．电解磨削技术及应用前景［J］．机械工程师，1996（5）：60-62.
［49］ 干为民，徐家文，刘延禄．平行直纹展成电解磨削整体叶轮的控制技术［J］．精密制

造与自动化，2002（2）：16-20.
［50］ 刘曙光．单头电脑刺绣机控制器的研制与应用［J］．西北纺织工学院学报，1996，10（3）：243-246.
［51］ 李红兵等．智能电脑刺绣集成环境 ICEE［J］．计算机辅助设计与图形学学报，2000，12（1）：1-5.
［52］ 江卫华．基于 DSP 三维电脑雕刻机控制系统的设计［J］．武汉化工学院学报，2002，24（3）：55-57.
［53］ 陶守林．电子束加工在汽车桥壳制造中的应用［J］．汽车技术，1997（7）：42-46.
［54］ 赵葛霄，黄玉辉．电子束加工技术在微细弯孔加工中的应用研究［J］．电加工与模具，2000（6）：28-29.
［55］ 周建光，等．新型红外测油仪中的液芯波导技术［J］．吉林大学学报，2002（1）：101-104.
［56］ 周建光，等．一种新型红外测油仪的研制［J］．分析仪器，2002（1）：8-13.
［57］ 董莉莉，熊经武，万秋华．光电轴角编码器的发展动态［J］．光学精密工程，2000，8（2）：198-202.
［58］ 郁有文．单道绝对式光电轴角编码器［J］．南京师范大学学报，2003，3（1）：34-37.
［59］ 孔智勇，等．一种高精度绝对式光电轴角编码器的照明系统［J］．光学技术，2003，29（1）：30-33.
［60］ 周惠丽，王德义，陈凤英．激光切割机在板类件加工中的应用［J］．现代化农业，2002（3）：28-30.
［61］ 金杰，董鸿晔，张晓明．智能化光栅数显表在大直径测量中的应用［J］．仪表技术与传感器，1998（2）：38-40.
［62］ 金永君，艾延宝．核磁共振技术及应用［J］．物理与工程，2002，12（2）：47-50.
［63］ 张保祯，等．核磁共振和彩色多普勒对椎动脉成像的应用［J］．内蒙古医学杂志，2001，33（1）：55-60.
［64］ 倪树新，李一飞．军用激光雷达的发展趋势［J］．红外与激光工程，2003，32（2）：111-114.
［65］ 王戎瑞．美国导弹防御激光雷达技术［J］．激光与红外，1999，29（5）：263-266.
［66］ 谭显裕．激光雷达测距方程研究［J］．电光与控制，2001（1）：12-18.
［67］ 徐润君，陈心中．激光雷达在军事中的应用［J］．物理与工程，2002，12（6）：36-39.
［68］ 陈梦东，等．机器人辅助微损伤神经外科手术系统的研究及其临床应用［J］．中国生物医学工程学报，2000，19（2）：145-151.
［69］ 邓琦林，等．激光近形制造金属零件的实验研究［J］．电加工与模具，2001（1）：28-30.
［70］ 邓琦林．激光近形制造过程中的裂纹分析［J］．电加工与模具，2000（3）：21-23.
［71］ 邓琦林，等．激光近形制造技术［J］．电加工，1999（6）：37-40.
［72］ 陈树明．激光切割技术现状与发展［J］．锻压机械，2002（2）：3-5.
［73］ 罗维平．大型三维激光切割机的自动控制系统［J］．激光杂志，2001，22（6）：73-74.
［74］ 程松涛．电铸镍在激光全息防伪中的应用［J］．电镀与精饰，2002，24（3）：12-14.
［75］ 曹玉琳．激光全息防伪标识的机器识别系统［J］．激光与红外，2000，30（4）：214-219.

［76］　邓琦林．激光熔覆成形金属零件的精度分析［J］．航空精密制造技术，2000，36（4）：13-17.
［77］　付浩，等．室温磁制冷复合材料激光熔覆成形工艺研究［J］．稀有金属材料与工程，2003，32（5）：387-389.
［78］　张求知，李克己，姜长生．激光制导炸弹的火控原理及应用［J］．火力与指挥控制，2001，26（1）：18-22.
［79］　周伯勋．激光制导技术在航空武器装备中的应用与发展［J］．电子器件，1998，21（4）：274-280.
［80］　李健心．精密电铸成形技术及应用［J］．新工艺·新技术·新设备，2002（1）：59-60.
［81］　杜昭辉，吴耀华，颜永年．快速原型技术医学应用的研究［J］．机械工业自动化，1997，19（3）：53-56.
［82］　谢宋和．负荷传感器及其在模糊控制洗衣机中的应用［J］．家用电器科技，1998（1）：16-18.
［83］　张建钢，等．模糊控制洗衣机混浊度检测系统［J］．湖北工学院学报，2002，17（1）：8-10.
［84］　陈兴国，陈江鸿．模糊控制洗衣机的设计［J］．湖南大学学报，2002，29（3）：24-26.
［85］　陈琦．平面电机的控制及其应用前景［J］．电子工业专用设备，2000，29（1）：28-29.
［86］　陈守文，成一．汽车安全气囊的研究与发展［J］．汽车研究与开发，2002（1）：16-18.
［87］　贾石峰．汽车安全气囊加速度传感器的研究［J］．甘肃科学学报，2002，14（4）：91-93.
［88］　毕海峰，张玉梅，王华平．汽车安全气囊的技术发展［J］．现代纺织技术，2001，9（1）：53-56.
［89］　钟志华，杨济匡．汽车安全气囊技术及其应用［J］．中国机械工程，2000，11（1～2）：234-237.
［90］　何文，钟志华，杨济匡．汽车安全气囊技术的新发展［J］．汽车安全．2000（4）：33-37.
［91］　李令举，齐邓林．汽车安全气囊概述和机械式气囊［J］．汽车电器，1997（6）：1-3.
［92］　张群．扫描隧道显微镜［J］．上海计量测试，2002，29（2）：47-48.
［93］　杨学恒，等．扫描隧道显微镜系统［J］．重庆大学学报，2001，24（3）：137-141.
［94］　马文坡．红外多光谱扫描仪设计与评价［J］．红外技术，2002，24（5）：1-4.
［95］　付士林．谈谈扫描仪［J］．电脑世界，2001（6）：5-8.
［96］　贾继虔．数控机床的位置检测装置及其应用［J］．组合机床与自动化加工技术，2002（7）：41-42.
［97］　白杉，子荫．数码相机市场的现状和未来［J］．影像材料，2002（4），54-58.
［98］　王博，王毅．数码相机发展及市场格局［J］．计算机工程与应用，2001（4）：45-46.
［99］　李郁．关于数码相机图像传感器的工作原理［J］．高等函授学报，2002，15（5）：20-23.
［100］　任明璋，王欣．数码相机的光电成像原理［J］．中学物理数学参考，2002，31（6）：61.
［101］　侯雨石，等．数码相机原理与系统设计研究［J］．光学技术，2002，28（5）：452-458.
［102］　李神速，施志大，王蕴．数字化显微硬度计及功能测试软件开发研究［J］．上海应用技术学院学报，2001，1（1）：18-22.

［103］ 杨郑继．信息家电网络技术信息家电网络技术［J］．信息技术与应用，2001（4）：26-30.
［104］ 廖中华．自动化仓储与管理系统［J］．物流技术与应用，1999，4（4）：30-32.
［105］ 裴仁清．机电一体化原理［M］．上海：上海大学出版社，1998.
［106］ 殷际英，林宋，方建军．光机电一体化实用技术［M］．北京：化学工业出版社，2003.
［107］ 文秀兰，林宋，谭昕，钟建琳．超精密加工技术与设备［M］．北京：化学工业出版社，2006.
［108］ 杨长能，等．可编程控制器基础及应用［M］．重庆：重庆大学出版社，1992.
［109］ 张毅刚，等．MCS-51 单片机应用设计［M］．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1997.
［110］ 胡崇岳．现代交流调速技术［M］．北京：机械工业出版社，2001.
［111］ 吴守箴，等．电气传动的脉宽调制控制技术［M］．北京：机械工业出版社，2003.
［112］ 谭建成．电机控制专用集成电路［M］．北京：机械工业出版社，2001.
［113］ 刘政华，等．机械电子学［M］．长沙：国防科技大学出版社，1999.
［114］ 徐德，孙同景．可编程控制器（PLC）应用技术［M］．济南：山东科学技术出版社，1996.
［115］ 钟约先，林亨．机械系统计算机控制［M］．北京：清华大学出版社，2001.
［116］ 胡佑德，等．伺服系统原理与设计［M］．修订版．北京：北京理工大学出版社，1999.
［117］ 杨汝清．现代机械设计——系统与结构［M］．上海：上海科学技术文献出版社，2000.
［118］ 张宇河，等．计算机控制系统［M］．北京：北京理工大学出版社，2002.
［119］ 魏永广，刘存．现代传感技术［M］．沈阳：东北大学出版社，2001.
［120］ 固高科技（深圳）有限公司．GE&GT 系列运动控制器用户手册和编程手册，2008.
［121］ 张琳娜，刘武发．传感检测技术及应用［M］．北京：中国计量出版社，1999.
［122］ 张崇巍，李汉强．运动控制系统［M］．武汉：武汉理工大学出版社，2001.
［123］ 高森年．机电一体化［M］．北京：科学出版社，2001.
［124］ 徐承忠，等．数字伺服系统［M］．北京：国防工业出版社，1994.
［125］ 江利进，龙腾宇．固高运动控制卡在五轴数控磨床的应用研究［J］．机械，2005（12）：46-48.
［126］ 李秀忠．常用医疗器械原理与维修［M］．北京：机械工业出版社，2002.
［127］ 黄权，等．神经网络在压合过程中的应用［J］．兵工自动化，2002，21（4）：12-14.
［128］ 马国华．监控组态软件及其应用［M］．北京：清华大学出版社，2001.
［129］ 齐智平．机电一体化系统的软件技术［M］．北京：中国电力出版社，1998.
［130］ 暴金生，周企樱．智能仪器设计基础［M］．北京：机械工业出版社，1989.
［131］ 吴宗凡，等．红外与微光技术［M］．北京：国防工业出版社，1998.
［132］ Panasonic 交流伺服电机驱动器 MINAS A 系列使用说明书．
［133］ 刘润彬，张华．软件工程简明教程［M］．大连：大连理工大学出版社，1994.
［134］ 李刚，杨继东．基于 PC 的开放式数控系统的开发［J］．机床与液压，2006（4）：82-83.

[135]　李小雷，等．开放式数控刻楦机系统应用软件的开发［J］．机床与液压，2006（2）：166-168.
[136]　高东杰，谭杰，林红权．应用先进控制技术［M］．北京：国防工业出版社，2003.
[137]　蔡自兴．智能控制；基础与应用［M］．北京：国防工业出版社，1998.
[138]　诸静，等．模糊控制原理与应用［M］．北京：机械工业出版社，1995.
[139]　陈炳和．计算机控制系统基础［M］．北京：北京航空航天大学出版社，2001.
[140]　周凯．PC 数控原理、系统及应用［M］．北京：机械工业出版社，2006.
[141]　徐元昌．机械电子技术［M］．上海：同济大学出版社，1995.
[142]　史维祥，唐建中，周福章，等．近代机电控制原理［M］．北京：机械工业出版社，1998.
[143]　李培根，汤漾平．机电一体化设计［M］．江西：江西科学技术出版社，2001.

ISBN 978-7-111-29732-1

封面设计·电脑制作：姚毅

上架指导：工业技术/机械工程/机电一体化




地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销 售 一 部：(010)68326294
销 售 二 部：(010)88379649
读者服务部：(010)68993821

邮政编码：100037
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

定价：48.00元